# QM

Chauffages au bois

# Manuel de planification

Élaboré par le groupe de travail
QM Chauffages au bois



4ème édition complètement révisée en français

QM Chauffages au bois (en allemand « QM Holzheizwerke ») est un **système de gestion de la qualité** pour les installations de chauffage à eau chaude et à eau surchauffée fonctionnant avec des combustibles dérivés du bois et de la biomasse dans **une plage de puissance d'environ 100 kW à plus,** destinées à l'approvisionnement en chaleur de bâtiments individuels ou de réseaux de chauffage à distance et à distance. Il se concentre sur la conception, la planification et la réalisation professionnelles de l'installation de production de chaleur et du réseau de chaleur. Les critères de qualité importants sont une sécurité de fonctionnement élevée, une régulation précise, de bonnes propriétés en matière d'hygiène de l'air et une logistique de combustible économique. L'objectif est un fonctionnement efficace, à faibles émissions et économique de l'ensemble de l'installation.

Le système de gestion de la qualité a été développé à la base en Suisse en 1998 et mis en place progressivement. En 2004, le **groupe de travail** international **QM Chauffages au bois** a été fondé afin de proposer des normes de qualité communes pour les centrales de chauffage au bois sous la désignation QM Chauffages au bois.

Le présent **manuel de planification** explique le déroulement du projet et montre comment les objectifs de qualité pour l'installation de production de chaleur et le réseau de chaleur peuvent être atteints grâce à une planification et exécution professionnelles.

Le manuel de planification fait partie de **la série de publications QM Chauffages au bois / QM Holzheizwerke,** dans laquelle les volumes suivants ont été publiés jusqu'à présent :

Volume 1 : Guide qualité (avec plan qualité)
ISBN 978-3-937441-91-7

Volume 2 : Solutions standards – Partie I
ISBN 978-3-937441-92-4

Volume 3 : Appel d'offre standard – POUR CH
(version suisse pour une chaudière à bois)
ISBN 978-3-937441-87-0

Volume 3 : Appel d'offre standard – POUR CH
(version suisse pour deux chaudières à bois)
ISBN 978-3-937441-88-7

Volume 4 : Manuel de planification
ISBN 978-3-937441-96-2

Volume 5 : Solutions standards – Partie II
ISBN 978-3-937441-95-6

La série de publications est disponible gratuitement sur le site web du groupe de travail QM Chauffages au bois (www.qm-chauffages-bois.ch). Ce site web contient également d'autres documents, des outils logiciels et des FAQ sur les questions fréquemment posées et les développements actuels dans le domaine du bois-énergie. Certains volumes de la série ont été traduits en anglais, en italien et parfois dans d'autres langues avec le soutien du projet européen Interreg ENTRAIN (disponibles gratuitement, voir www.qm-biomass-dh-plants.com).

suisseénergie
Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg
Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Energie-bois SUISSE
C.A.R.M.E.N.
AEE INTEC
APE Agenzia Per l'Energia del Friuli Venezia Giulia
www.ape.fvg.it

Série de publications QM Chauffages au bois /
QM Holzheizwerke, volume 4

Élaboré par le groupe de travail
QM Holzheizwerke

# Manuel de planification

Élaboré par le
groupe de travail
QM Holzheizwerke /
QM Chauffages au bois

4ème édition complètement révisée en français

C.A.R.M.E.N. e.V. Straubing 2026

## Groupe de travail QM Chauffages au bois

Pour la Suisse :
Énergie-bois Suisse avec le soutien financier de l'Office fédéral de l'énergie
www.qm-chauffages-bois.ch
www.energie-bois.ch
www.holzenergie.ch

Pour l'Autriche :
AEE INTEC - Institut für Nachhaltige Technologien
www.klimaaktiv.at/qmheizwerke

Pour l'Allemagne :
Bade-Wurtemberg : HFR - École supérieure de sylviculture de Rottenburg
Bavière : C.A.R.M.E.N. e.V.
www.carmen-ev.de

Pour l'Italie :
APE FVG - Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia
www.ape.fvg.it

Ces sites web contiennent des informations et des publications sur le thème de l'énergie du bois. Des outils logiciels peuvent également y être téléchargés.

© Groupe de travail QM Holzheizwerke 2004 - 2026. Reproduction partielle autorisée avec mention de la source.

QM Holzheizwerke® et QM Chauffages au bois®
sont une marque déposée.

## Équipe du groupe de travail QM Chauffages au bois

Matthias Bendig, Office fédéral de l'énergie, CH

Laurent Audergon, Energie-bois Suisse, CH

Stefan Thalmann (direction ARGE QMH), Verenum AG, CH
Jürgen Good, Verenum AG, CH
Daniel Zaugg, Verenum AG

Andres Jenni, ardens GmbH, CH

Patrik Küttel, fokus-e gmbh, CH

Martin Kiener, EnOp GmbH

Christian Ramerstorfer, AEE INTEC, AT
Sabrina Metz, AEE INTEC, AT
Stefan Retschitzegger, AEE INTEC, AT

Wolfram Schöberl, C.A.R.M.E.N. e.V., DE
Christian Leuchtweis, C.A.R.M.E.N. e.V., DE
Sabine Hiendlmeier, C.A.R.M.E.N. e.V., DE
Matthias Wanderwitz, C.A.R.M.E.N. e.V., DE

Harald Thorwarth, HFR, DE
Johanna Eichermüller, HFR, DE

Matteo Mazzolini, APE FVG, IT
Matteo de Piccoli, APE FVG, IT

## Équipe de rédaction des troisième et quatrième éditions

Jürgen Good (direction), Verenum AG
Stefan Thalmann, Verenum AG
Thomas Nussbaumer, Verenum AG
Andreas Keel, Énergie-bois Suisse
Andres Jenni, ardens GmbH
Patrik Küttel, fokus-e gmbh
Harald Schrammel, AEE INTEC
Sabrina Metz, AEE INTEC
Christian Ramerstorfer, AEE INTEC
Jakob Binder, AEE INTEC
Gilbert Krapf, C.A.R.M.E.N. e.V.
Niels Alter, C.A.R.M.E.N. e.V.
Christian Letalik, C.A.R.M.E.N. e.V.
Harald Thorwarth, HFR
Johanna Eichermüller, HFR

## Ancienne équipe de rédaction (première et deuxième éditions)

Jürgen Good (coordination), Verenum AG
Friedrich Biedermann, BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH
Ruedi Bühler, Environnement et énergie
Helmut Bunk, Agence pour la protection du climat et l'énergie (KEA-BW)
Thomas Deines, ministère de l'Alimentation et de l'Espace rural du Bade-Wurtemberg
Hans Rudolf Gabathuler, Gabathuler Beratung GmbH
Alfred Hammerschmid, BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH
Andres Jenni, ardens GmbH
Gilbert Krapf, C.A.R.M.E.N. e.V.
Thomas Nussbaumer, Verenum AG
Ingwald Obernberger, BIOS BIOENERGIESYSTEME GmbH
Bernhard Pex, C.A.R.M.E.N. e.V.
Christian Rakos, Agence de valorisation énergétique E.V.A.

ISBN 978-3-937441-90-5 Série de publications QM Chauffages au bois
ISBN 978-3-937441-96-2 Volume 4: Manuel de planification

# Préface

À la demande de l'Office fédéral de l'énergie et de certains cantons, des experts suisses ont développé en 1998 un système de gestion de la qualité pour les grandes installations de chauffage au bois, qui a ensuite été progressivement mis en place sous le nom de AQ Chauffages au bois / QS-Holzheizung. Sur cette base, des représentants de Suisse, d'Autriche, du Bade-Wurtemberg, de Bavière, de Rhénanie-Palatinat (qui n'est plus actif) et, depuis 2020, d'Italie se sont regroupés au sein **du groupe de travail QM Chauffages au bois** afin de créer ensemble des normes de qualité pour les installations de chauffage au bois et de les proposer sous le nom de QM Holzheizwerke, en français QM Chauffages au bois. L'accent est mis sur la conception, la planification et la réalisation professionnelles de l'installation de production de chaleur et du réseau de chaleur. Les critères de qualité importants sont une sécurité de fonctionnement élevée, une régulation précise, de bonnes propriétés en matière d'hygiène de l'air et une logistique de combustible économique. L'objectif est un fonctionnement efficace, à faibles émissions et économique de l'ensemble de l'installation.

QM Chauffages au bois est conçu pour les installations de chauffage à eau chaude et à eau surchauffée fonctionnant avec des combustibles ligneux et de la biomasse (plaquettes/broyats, écorces, sciures, pellets, etc.) d'**une puissance d'environ 100 kW minimum** pour l'approvisionnement en chaleur de bâtiments individuels ou de réseaux de chauffage à distance et à distance. Les installations de production d'électricité ne sont pas prises en compte, mais il est recommandé de tenir compte de QM Chauffages au bois de manière analogue ou dans la mesure du possible pour ces installations également.

Le présent **manuel de planification fait partie de la série de publications QM Chauffages au bois**, explique le déroulement du projet et montre comment atteindre les objectifs de qualité pour l'installation de production de chaleur et pour le réseau de chaleur grâce à une planification et exécution professionnelles. Il s'adresse en particulier aux investisseurs, aux exploitants et aux planificateurs d'installations, mais fournit également des bases importantes pour la formation initiale et continue, la recherche et le développement, ainsi que pour les organismes de financement et les décideurs politiques et administratifs. Le manuel de planification est divisé en quatre parties et comprend une annexe complémentaire. La première partie, introductive, explique les principes fondamentaux d'une utilisation rationnelle de l'énergie au sens de la gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois et les premières étapes du développement du projet. La deuxième partie couvre les bases techniques et économiques de la planification, de la construction et de l'exploitation des centrales de chauffage au bois. La troisième partie décrit étape par étape le processus de planification jusqu'à la mise en service et la réception de l'installation. Enfin, la quatrième partie transmet le savoir-faire nécessaire à l'exploitation, la gestion, l'optimisation et la modernisation des installations. L'annexe résume des infos complémentaires, calculs et outils, et explique les principaux termes techniques dans un glossaire.

Afin de tenir compte de l'évolution constante de la technologie et du savoir-faire en 2022, la 3ème édition du manuel de planification a été entièrement révisée, mise à jour et complétée par le Groupe de travail QM Chauffages au bois l'équipe (ARGE QM Holzheizwerke). Elle se base sur l'état actuel de la technique. Les « nouveaux concepts d'installations » qui se développent actuellement, tels que les installations à plusieurs chaudières avec des appareils en série, la condensation des gaz d'échappement en combinaison avec des pompes à chaleur ou l'interaction des centrales de chauffage au bois avec diverses autres sources de chaleur renouvelables intégrées de manière centralisée ou décentralisée (énergie solaire thermique, géothermie, chaleur résiduelle, pompe à chaleur, etc.) sont également traités, dans la mesure où des connaissances suffisantes et confirmées par la pratique sont déjà disponibles.

Afin d'améliorer la lisibilité et de permettre une application plus large, y compris au niveau international, la préférence a été donnée à des formulations générales et les informations et passages spécifiques à certains pays ont été largement supprimés. Dans la mesure du possible, le manuel de planification fait référence à des normes et directives internationales. Il ne fait pas explicitement référence aux normes, lois et réglementations spécifiques à certains pays. Celles-ci font partie de l'annexe.

La présente 4ème édition légèrement révisée du manuel utilise parfois différents termes et désignations (p. ex. « bois déchiqueté » versus « plaquettes » ou « copeaux de bois », « centrale de chauffage au bois » vs « centrale de chauffage à la biomasse ») qui sont toutefois compréhensibles par tous. L'orthographe est basée sur l'usage linguistique helvétique, tout comme le format des chiffres. Pour les définitions détaillées des termes spécifiques à chaque pays, l'auteur renvoie explicitement aux lois, normes et réglementations nationales correspondantes.

En ce qui concerne **les coûts indiqués**, il n'est possible de tenir compte que dans une certaine mesure des différences de niveau de prix entre les différents pays. Il convient ici de tenir compte des explications spécifiques relatives aux illustrations et aux informations fournies et, le cas échéant, de vérifier et d'adapter le niveau des prix en fonction des conditions nationales.

Le contenu de ce manuel de planification a été élaboré en toute bonne foi et vérifié avec le plus grand soin. Les auteurs ne peuvent toutefois assumer aucune responsabilité ni garantir l'exhaustivité, l'actualité, l'exactitude et la qualité des informations fournies. Le manuel de planification ne remplace pas une planification détaillée et spécifique au projet réalisée par des experts, ni la vérification et le respect des normes et dispositions légales en vigueur. Toute responsabilité des auteurs pour des dommages matériels ou immatériels résultant de l'utilisation du manuel de planification est exclue.

**L'équipe d'auteurs du Groupe de travail QM Chauffages au bois remercie les premiers auteurs du manuel de planification, sur le travail précieux et complet desquels s'appuie la nouvelle édition actuelle. Nous tenons également à remercier les nombreux experts du secteur pour leurs précieux commentaires et leur collaboration active dans le cadre de la consultation.**

**Nous adressons également des remerciements particuliers aux pionniers du groupe de travail ARGE QM Chauffages au bois, Ruedi Bühler, Hans Rudolf Gabathuler et Franz Promitzer, pour leur engagement dans le développement et la mise en place de normes de qualité pour les centrales de chauffage au bois.**

**La révision et la nouvelle édition du manuel de planification QM Chauffages au bois / QM Holzheizwerke dans les quatre langues FR / DE / IT / EN ont été rendues possibles grâce au soutien financier et humain des institutions suivantes, que nous remercions également chaleureusement !**

- Confédération suisse, Office fédéral de l'énergie
- Énergie-bois Suisse, Zurich / Echandens / Avegno
- Ministère fédéral autrichien de la protection du climat, de l'environnement, de l'énergie, de la mobilité, de l'innovation et de la technologie dans le cadre de l'initiative de protection du climat klimaaktiv
- APE FVG - Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia
- C.A.R.M.E.N. e.V., Bavière
- Association professionnelle pour Le bois-énergie du Bade-Wurtemberg e.V.

Groupe de travail QM Chauffages au bois /
ARGE QM-Chauffages au bois,
30 octobre 2026

# Aperçu

PARTIE 1 – UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE ..... 14
1 LE BOIS COMME SOURCE D'ÉNERGIE ..... 15
2 QM CHAUFFAGES AU BOIS ..... 19
3 DÉVELOPPEMENT DU PROJET ..... 24
PARTIE 2 – PRINCIPES FONDAMENTAUX ..... 28
4 BOIS-ÉNERGIE ..... 29
5 COMPOSANTS DE LA PRODUCTION DE CHALEUR ..... 46
6 COMPOSANTS POUR LE STOCKAGE, LE TRANSPORT ET LE DÉCENDRAGE DES COMBUSTIBLES ..... 66
7 HYDRAULIQUE DE LA PRODUCTION DE CHALEUR ..... 81
8 COMPOSANTS DE LA DISTRIBUTION DE CHALEUR ..... 95
9 CENDRES ..... 100
10 RENTABILITÉ ..... 106
PARTIE 3 – DÉROULEMENT DE LA PLANIFICATION ..... 118
11 RELEVÉ DE LA SITUATION ..... 119
12 CONCEPTION DU SYSTÈME DE DISTRIBUTION DE CHALEUR ..... 128
13 CHOIX DU SYSTÈME DE PRODUCTION DE CHALEUR ..... 136
14 CONCEPTION DU STOCKAGE ET DU TRANSPORT DU COMBUSTIBLE ..... 180
15 RÉALISATION ET RÉCEPTION DE LA CHAUDIÈRE À BOIS ..... 191
PARTIE 4 – EXPLOITATION ET GESTION ..... 197
16 OPTIMISATION DE L'EXPLOITATION APRÈS LA MISE EN SERVICE ..... 198
17 EXPLOITATION ET MAINTENANCE ..... 204
18 OPTIMISATION ET RÉNOVATION DES INSTALLATIONS EXISTANTES ..... 209
ANNEXE ..... 218
19 RÉGLEMENTATIONS ..... 219
20 CALCULS ET CONVERSIONS IMPORTANTS ..... 226
21 GLOSSAIRE (CTRL+F) ..... 245
22 BIBLIOGRAPHIE ..... 253
23 BIBLIOGRAPHIE ..... 260

# Table des matières

**PARTIE 1 – UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE ..... 14**

**1 LE BOIS COMME SOURCE D'ÉNERGIE ..... 15**
**1.1 Introduction ..... 15**
**1.2 Importance de l'énergie du bois ..... 15**
1.2.1 Origine ..... 15
1.2.2 Utilisation ..... 15
**1.3 Le rôle du bois-énergie dans le système énergétique ..... 17**
1.3.1 Importance en comparaison internationale ..... 17
1.3.2 Potentiel dans le système énergétique futur ..... 17
**1.4 Mesures de promotion pour le bois-énergie ..... 18**

**2 QM CHAUFFAGES AU BOIS ..... 19**
**2.1 Origine et objectif ..... 19**
**2.2 Pourquoi le QM Chauffages au bois ? ..... 19**
**2.3 QMstandard® ..... 20**
2.3.1 Personnes clés ..... 20
2.3.2 Tâches et responsabilités ..... 20
2.3.3 Déroulement de la planification avec étapes clés ..... 20
2.3.4 Plan Q ..... 21
2.3.5 Guide qualité ..... 21
2.3.6 Outils pour les planificateurs ..... 22
**2.4 QMmini ..... 23**
2.4.1 Domaine d'application ..... 23
2.4.2 Déroulement ..... 23
2.4.3 Documents et outils ..... 23

**3 DÉVELOPPEMENT DU PROJET ..... 24**
**3.1 De l'idée au kilowattheure ..... 24**
**3.2 Étude de faisabilité ..... 25**
3.2.1 Emplacement de la centrale de chauffage et du stockage de combustible ..... 25
3.2.2 Exigences en matière d'aménagement du territoire et d'urbanisme ..... 26
3.2.3 Disponibilité du combustible ..... 26
3.2.4 Périmètre de raccordement et intérêt pour le raccordement ..... 26
3.2.5 Concept général ..... 26
3.2.6 Coûts d'investissement et coûts de production de chaleur ..... 26
**3.3 Autres aspects ..... 27**
3.3.1 Financement ..... 27
3.3.2 Société d'exploitation ..... 27
3.3.3 Facteurs de réussite et « obstacles » ..... 27

**PARTIE 2 – PRINCIPES FONDAMENTAUX ..... 28**

**4 BOIS-ÉNERGIE ..... 29**
**4.1 Introduction ..... 29**
**4.2 Composition élémentaire des combustibles à base de bois ..... 29**
**4.3 Conditions de référence ..... 29**
**4.4 Paramètres importants ..... 30**
4.4.1 Teneur en eau et humidité du bois ..... 30
4.4.2 Teneur en cendres ..... 31
4.4.3 Pouvoir calorifique et pouvoir calorifique supérieur ..... 31
4.4.4 Masse volumique ..... 32
**4.5 Approvisionnement en combustible pour les chaudières à bois à alimentation automatique ..... 33**
4.5.1 Aperçu ..... 33

4.5.2 Assortiments de bois énergie ... 34
4.5.3 Préparation du combustible ... 37
4.5.4 Paramètres de qualité ... 38
4.5.5 Stratégies d'approvisionnement ... 42
**4.6 Analyse ... 43**
**4.7 Contrat de livraison de combustible et facturation ... 44**
4.7.1 Contrat de fourniture de combustible ... 44
4.7.2 Facturation au volume ... 44
4.7.3 Facturation au poids ... 44
4.7.4 Facturation en fonction de la quantité de chaleur produite ... 45

**5 COMPOSANTS DE LA PRODUCTION DE CHALEUR ... 46**
**5.1 Domaines d'application ... 46**
**5.2 Principes fondamentaux de la combustion ... 47**
**5.3 Technologies de combustion ... 47**
5.3.1 Aperçu ... 47
5.3.2 Chaudières à lit fixe ... 48
5.3.3 Combustion en lit fluidisé ... 50
5.3.4 Combustion de poussières ... 51
**5.4 Transfert de chaleur dans la partie chaudière ... 51**
**5.5 Nettoyage automatique des tubes de chaudière ... 52**
**5.6 Origine des émissions ... 53**
**5.7 Mesures primaires de réduction des émissions ... 54**
**5.8 Mesures secondaires de réduction des émissions ... 55**
5.8.1 Dépoussiérage ... 55
5.8.2 Dénitrification ... 58
**5.9 Récupération de chaleur avec économiseur et condensation des gaz d'échappement ... 59**
**5.10 Technique de contrôle des processus ... 60**
5.10.1 Principes de base ... 60
5.10.2 Exigences relatives à l'équipement de mesure et à la saisie des données ... 63
5.10.3 Planification et exécution ... 63

**6 COMPOSANTS POUR LE STOCKAGE, LE TRANSPORT ET LE DÉCENDRAGE DES COMBUSTIBLES ... 66**
**6.1 Remarque préliminaire ... 66**
**6.2 Stockage de combustible ... 66**
**6.3 Remplissage de silos et d'entrepôts ... 68**
6.3.1 Remplissage de silos à plaquettes de bois ... 68
6.3.2 Remplissage et gestion des entrepôts ... 70
6.3.3 Remplissage des silos à plaquettes ... 72
6.3.4 Remplissage des silos à pellets ... 73
**6.4 Extraction ... 73**
6.4.1 Systèmes d'extraction pour tous les combustibles ... 73
6.4.2 Systèmes d'extraction spéciaux ... 75
**6.5 Systèmes de transport ... 76**
**6.6 Alimentation du foyer ... 78**
**6.7 Dispositif anti-retour de flamme dans le système d'alimentation en combustible ... 79**
**6.8 Décendrage ... 79**

**7 HYDRAULIQUE DE LA PRODUCTION DE CHALEUR ... 81**
**7.1 Principes hydrauliques ... 81**
**7.2 Régulation du circuit de chaudière ... 81**
7.2.1 Vanne de régulation du circuit de chaudière ... 81
7.2.2 Bypass dans circuit de chaudière ... 83
**7.3 Pompes ... 84**
7.3.1 Types de pompes ... 84

7.3.2 Conception des pompes ... 84
7.3.3 Pompe de chaudière à vitesse variable ... 85
7.3.4 Sécurité de fonctionnement et redondance de la pompe de chaudière ... 86
**7.4 Compteurs de chaleur ... 86**
7.4.1 Caractéristiques des compteurs de chaleur ... 87
7.4.2 Exigences relatives aux différentes méthodes de mesure du débit ... 87
7.4.3 Installation d'un compteur de chaleur ... 88
7.4.4 Influence sur l'autorité de la vanne ... 89
**7.5 Accumulateur de chaleur ... 89**
7.5.1 Accumulateur de chaleur dans la centrale de chauffage ... 89
7.5.2 Intégration hydraulique de l'accumulateur thermique ... 91
**7.6 Questions sur l'hydraulique de la production de chaleur ... 93**
7.6.1 Qualité de l'eau ... 93
7.6.2 Prévention des circulations incorrectes ... 94

**8 COMPOSANTS DE LA DISTRIBUTION DE CHALEUR ... 95**
**8.1 Aperçu ... 95**
**8.2 Systèmes de tuyauterie ... 95**
**8.3 Raccords ... 95**
**8.4 Surveillance des fuites ... 96**
**8.5 Transmission des données et communication ... 97**
**8.6 Mise en place du réseau ... 97**
**8.7 Méthodes et situations de pose ... 97**
**8.8 Qualité de l'eau dans le réseau de chauffage ... 98**
**8.9 Transfert de chaleur ... 98**
8.9.1 Raccordement des clients ... 98
8.9.2 Exigences relatives au transfert de chaleur ... 98

**9 CENDRES ... 100**
**9.1 Production de cendres ... 100**
**9.2 Fractions de cendres ... 100**
**9.3 Composition des cendres ... 101**
**9.4 Élimination et valorisation ... 102**
9.4.1 Situation en Suisse ... 103
9.4.2 Situation en Allemagne ... 104
9.4.3 Situation en Autriche ... 105

**10 RENTABILITÉ ... 106**
**10.1 Question de rentabilité concernant les centrales de chauffages au bois ... 106**
**10.2 Responsabilités ... 106**
**10.3 Structure des coûts des centrales de chauffage au bois ... 107**
**10.4 Analyse de rentabilité ... 108**
10.4.1 Introduction ... 108
10.4.2 Calcul des coûts de chauffage à l'aide de la méthode des annuités ... 109
10.4.3 Méthode de la valeur actuelle nette (VAN) et taux de rendement interne (TRI) ... 110
10.4.4 Comparaison des variantes ... 110
10.4.5 Analyse de sensibilité ... 111
**10.5 Structure tarifaire de la vente de chaleur ... 111**
**10.6 Plan d'affaires ... 113**
10.6.1 Structure et contenu ... 113
10.6.2 Bilan prévisionnel et compte de résultat provisionnel ... 113
**10.7 Outil de calcul de rentabilité des centrales de chauffage au bois QM ... 114**
**10.8 Estimation des coûts d'investissement ... 116**

**PARTIE 3 – DÉROULEMENT DE LA PLANIFICATION ... 118**

**11 RELEVÉ DE LA SITUATION ... 119**
**11.1 Introduction ... 119**

**11.2 Analyse des besoins en chaleur ... 120**
11.2.1 Nouvelles constructions ... 120
11.2.2 Bâtiments existants ... 120
11.2.3 Zones constructibles ... 121
**11.3 Besoins en chaleur de l'ensemble de l'installation ... 123**
11.3.1 Détermination des besoins en puissance thermique ... 123
11.3.2 Besoins en puissance thermique représentés sous forme de courbe de charge ... 124
**11.4 Analyse des sources de chaleur ... 126**
**11.5 Intégration dans le déroulement du projet « Gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois » ... 126**

**12 CONCEPTION DU SYSTÈME DE DISTRIBUTION DE CHALEUR ... 128**
**12.1 Introduction ... 128**
**12.2 Indicateurs et termes clés ... 128**
12.2.1 Zone de distribution potentielle ... 128
12.2.2 Densité thermique ... 129
12.2.3 Clients clés ... 129
12.2.4 Taux de couverture ... 130
12.2.5 Facteur de simultanéité ... 130
12.2.6 Densité de raccordement ... 130
12.2.7 Coûts d'investissement spécifiques ... 131
12.2.8 Pertes de distribution thermique ... 131
12.2.9 Dérogation aux critères d'efficacité ... 131
**12.3 Déroulement du projet ... 132**
**12.4 Dimensionnement des diamètres des conduites ... 132**
12.4.1 Recommandations pour le dimensionnement ... 132
12.4.2 Procédure de dimensionnement ... 133
12.4.3 Méthodes de calcul ... 133
**12.5 Évolutions dans le domaine des réseaux de chaleur ... 133**

**13 CHOIX DU SYSTÈME DE PRODUCTION DE CHALEUR ... 136**
**13.1 Introduction ... 136**
**13.2 Comparaison écologique avec d'autres générateurs de chaleur ... 136**
13.2.1 Aperçu ... 136
13.2.2 Exemples ... 137
**13.3 Exigences générales et définition des principaux termes ... 141**
**13.4 Qualité du combustible et système de combustion ... 142**
**13.5 Sélection et conception du système de production de chaleur ... 143**
13.5.1 Variantes de base des systèmes de production de chaleur avec installation de chauffage au bois ... 144
13.5.2 Description des variantes de base ... 149
13.5.3 Procédure à suivre pour la conception d'une installation bivalente ... 154
13.5.4 Choix du système de combustion ... 154
13.5.5 Dimensionnement de l'accumulateur de chaleur ... 154
13.5.6 Besoins en combustible bois ... 155
**13.6 Autres variantes du système de production de chaleur ... 156**
13.6.1 Installations à plusieurs chaudières avec des appareils standards de série ... 156
13.6.2 Chaudière à bois supplémentaire avec combustible de haute qualité pour le fonctionnement en été ... 157
13.6.3 Cogénération ... 158
**13.7 Sources de chaleur complémentaires et systèmes de production de chaleur ... 159**
13.7.1 Remarques générales ... 159
13.7.2 Récupération de la chaleur à partir des gaz d'échappement ... 160
13.7.3 Pompes à chaleur ... 163
13.7.4 Énergie solaire ... 167
13.7.5 Récupération de chaleur ... 169

**13.8 Fourniture de chaleur industrielle ... 171**
**13.9 Conception des composants de l'installation ... 172**
13.9.1 Sélection du système de dépoussiérage ... 172
13.9.2 Sélection des procédés de réduction des oxydes d'azote ... 174
13.9.3 Sélection des composants supplémentaires ... 175
**13.10 Conception de la centrale de chauffage ... 176**
13.10.1 Centrale de chauffage ... 176
13.10.2 Conteneurs de chauffage et centrales de chauffage comme éléments préfabriqués ... 177
13.10.3 Besoins en énergie auxiliaire ... 177
13.10.4 Cheminée, conduit de fumée ... 177
13.10.5 Protection contre le bruit ... 178

**14 CONCEPTION DU STOCKAGE ET DU TRANSPORT DU COMBUSTIBLE ... 180**
**14.1 Remarques générales ... 180**
**14.2 Sélection et dimensionnement du stockage du combustible ... 180**
14.2.1 Types de stockage de combustible ... 180
14.2.2 Dimensionnement ... 180
14.2.3 Conception du silo à combustible ... 182
14.2.4 Ventilation du silo ... 183
14.2.5 Conception de l'entrepôt ... 184
14.2.6 Stockage extérieur ... 185
14.2.7 Combustion spontanée et pertes de matière ... 185
14.2.8 Conception du silo à plaquettes ... 186
14.2.9 Conception des entrepôts à pellets ... 186
**14.3 Sélection et dimensionnement du système d'alimentation en combustible ... 187**
14.3.1 Remarques générales ... 187
14.3.2 Transport du combustible ... 187
14.3.3 Extraction ... 188
14.3.4 Systèmes de transport du combustible ... 188
14.3.5 Alimentation de la chaudière ... 188
**14.4 Sélection et dimensionnement du système de décendrage ... 189**

**15 RÉALISATION ET RÉCEPTION DE LA CHAUDIÈRE À BOIS ... 191**
**15.1 Exigences générales et définition des principaux termes ... 191**
**15.2 Surveillance des travaux ... 191**
**15.3 Points critiques pendant la phase de construction ... 192**
**15.4 Mise en service et démarrage ... 192**
15.4.1 Préparatifs pour la mise en service, mise en service à froid ... 192
15.4.2 Mise en service à chaud de l'installation ... 193
**15.5 Réception ... 194**

**PARTIE 4 – EXPLOITATION ET GESTION ... 197**

**16 OPTIMISATION DE L'EXPLOITATION APRÈS LA MISE EN SERVICE ... 198**
**16.1 Motifs et objectifs ... 198**
**16.2 Conditions préalables et responsabilités ... 199**
**16.3 Traitement et évaluation des données ... 199**
**16.4 Mise en œuvre ... 202**

**17 EXPLOITATION ET MAINTENANCE ... 204**
**17.1 Organisation de l'exploitation ... 204**
**17.2 Fonctionnement technique ... 204**
**17.3 Maintenance ... 204**
17.3.1 Généralités ... 204
17.3.2 Maintenance et inspection ... 205
17.3.3 Réparation et amélioration ... 207
**17.4 Sécurité au travail ... 207**
**17.5 Assurances ... 207**

**18 OPTIMISATION ET RÉNOVATION DES INSTALLATIONS EXISTANTES.....209**
**18.1 Explications ..... 209**
**18.2 Optimisation des installations existantes ..... 209**
18.2.1 Procédure ..... 209
18.2.2 Analyse de la situation actuelle sur les plans technique et économique ..... 209
18.2.3 Évaluation des résultats de l'analyse de la situation actuelle ..... 210
18.2.4 Mesures visant à optimiser les installations existantes ..... 213
**18.3 Rénovation des installations existantes ..... 215**
18.3.1 Introduction ..... 215
18.3.2 Procédure à suivre en cas de rénovation ..... 215
18.3.3 Rénovation impossible ..... 217

**ANNEXE ..... 218**

**19 RÉGLEMENTATIONS ..... 219**

**20 CALCULS ET CONVERSIONS IMPORTANTS ..... 226**
**20.1 Indice d'excès d'air lambda ..... 226**
**20.2 Conversion de ppm en mg/m³ ..... 227**
**20.3 Référence en oxygène ..... 228**
**20.4 Conversion de mg/m³ en mg/MJ ..... 230**
**20.5 Conversion des gaz d'échappement humides en gaz d'échappement secs ..... 231**
**20.6 Détermination de la puissance thermique nominale ..... 232**
**20.7 Détermination du débit massique du combustible ..... 233**
**20.8 Détermination de la quantité d'air de combustion ..... 234**
**20.9 Détermination du débit volumique des gaz de combustion ..... 236**
**20.10 Détermination du débit massique de $NO_x$ ..... 237**
**20.11 Détermination du rendement de combustion ..... 239**
**20.12 Détermination du rendement annuel ..... 241**
**20.13 Unités courantes et conversions ..... 244**

**21 GLOSSAIRE (CTRL+F) ..... 245**

**22 BIBLIOGRAPHIE ..... 253**

**23 BIBLIOGRAPHIE ..... 260**

# Partie 1 – Utilisation rationnelle de l'énergie

# 1 Le bois comme source d'énergie

## 1.1 Introduction

Les forêts sont des écosystèmes précieux, des espaces de vie et de travail qui remplissent des fonctions utiles, protectrices et récréatives. De plus, les forêts, en tant que puits de $CO_2$, et le bois, en tant que matière première, contribuent de manière importante à la réduction des gaz à effet de serre. La sylviculture et l'industrie du bois sont des secteurs économiques importants en Europe centrale et contribuent à l'entretien du paysage culturel. La gestion forestière repose sur une sylviculture durable et proche de la nature. Cela signifie notamment que les prestations écologiques, économiques et sociales de la forêt sont assurées à long terme.

Le bois est l'une des matières premières renouvelables les plus importantes. La grande diversité des essences et des produits dérivés du bois, ainsi que leurs propriétés techniques et esthétiques, permettent un large éventail d'utilisations: bâtiments, papier, objets utilitaires – le bois joue souvent un rôle essentiel.

### Pourquoi le bois-énergie ?

**Intéressant sur le plan économique**

- Diversification de l'approvisionnement énergétique
- Indépendance en temps de crise
- Augmentation de la sécurité d'approvisionnement
- Revenus pour la sylviculture et l'industrie du bois
- Création de valeur ajoutée et emplois régionaux

**Respectueux de l'environnement**

- Renouvelable et neutre en $CO_2$
- Haute efficacité et faibles émissions
- Voies de transport courtes et peu risquées
- Traitement et stockage faciles
- Stockable et disponible à tout moment
- Peut-être combiné avec d'autres sources de chaleur renouvelables régionales

**Confort grâce au chauffage à distance à partir de la biomasse**

- Technologie éprouvée avec une grande sécurité d'approvisionnement
- Aucun entretien et faible encombrement pour les clients

Depuis des millénaires, le bois de chauffage est utilisé comme source de chaleur pour le chauffage, la cuisine, l'artisanat, la production de vapeur, etc. Au cours des dernières décennies, le bois a également pris une importance croissante en tant que source d'énergie sous forme de plaquettes et de granulés pour les installations de chauffage individuelles et les systèmes de chauffage à distance. Dans le cadre d'une utilisation économe en ressources et en cascade, la production de plaquettes et de granulés repose principalement sur des assortiments de bois-énergie et des sous-produits de la transformation du bois qui, autrement, resteraient inutilisés. La combustion du bois ne génère pas de $CO_2$ supplémentaire, car seule la quantité stockée pendant la croissance est rejetée dans l'atmosphère.

## 1.2 Importance de l'énergie du bois

### 1.2.1 Origine

Outre la forêt, qui constitue la principale source, une petite partie des besoins en bois de l'UE et de ses États membres est couverte par le bois recyclé et les importations de bois. La transformation industrielle du bois en divers produits s'effectue principalement dans les industries du sciage, des panneaux et du papier, ainsi que dans les entreprises en aval (menuiseries, charpenteries, fabrication de meubles, etc.) et prime sur l'utilisation du bois à des fins énergétiques. Le bois-énergie est issu de bois de faible diamètre, de bois endommagé (par exemple par des tempêtes ou des infestations de scolytes), de bois usagé, mais aussi de bois provenant de plantations à courte rotation ou de petites forêts (privées). Le reste du bois utilisé à des fins énergétiques est constitué de fractions de bois impropres à l'industrie (écorce, chutes de bois, sciure, plaquettes, résidus de la production de cellulose). Au total, la part de l'utilisation énergétique de la production totale de bois dans l'UE est d'environ 60 %. Figure 1.1 donne un aperçu des flux de bois dans l'UE en 2015. Pour une utilisation durable de l'énergie du bois, il est important de privilégier une utilisation régionale avec des distances de transport aussi courtes que possible. Par conséquent, les types de combustibles disponibles et leur origine dépendent fortement des conditions régionales et des chaînes de valeur.

### 1.2.2 Utilisation

Plus de 50 % des besoins énergétiques finaux de l'UE sont liés au chauffage. Dans le secteur du chauffage, environ 40 % sont destinés aux ménages et à l'industrie, le reste étant réparti entre le secteur des services, l'agriculture et d'autres secteurs [1].

Le bois-énergie joue un rôle clé dans la transition énergétique, en particulier dans la production de chaleur. Mais l'intérêt pour l'utilisation du bois et d'autres biomasses solides pour produire de l'électricité, des carburants ou des produits chimiques est également en hausse. Environ 17 % des besoins énergétiques finaux de l'UE sont couverts par des énergies renouvelables (Figure 1.2). La part de la bioénergie, y compris l'énergie du bois, les cultures énergétiques et les déchets biogènes, s'élève ici à environ 60 %. La majeure partie de la bioénergie est utilisée pour la production de chaleur (74,6 %). Le reste est consacré à la production d'électricité et de carburants.

Pour la **production de chaleur** dans les maisons individuelles et les immeubles collectifs, on utilise généralement des installations de combustion à alimentation manuelle (bûches, briquettes de bois, etc.) ou des systèmes de chauffage automatiques à pellets ou à plaquettes de bois. Pour cela, il existe des systèmes de combustion et des chaudières à la pointe de la technologie, ayant fait leurs preuves à maintes reprises, à haut rendement et à faibles émissions, proposées par un grand nombre de fabricants.

Les systèmes de chauffage à distance à biomasse, composés d'une centrale thermique, d'un réseau de distribution de chaleur et d'une station de transfert de chaleur, permettent d'alimenter en chaleur (chauffage, eau chaude, chaleur industrielle) quelques bâtiments ou de grandes villes (chauffage, eau chaude, chaleur industrielle) provenant de la combustion de plaquettes de bois, d'écorces, etc. dans des installations de combustion et des chaudières à biomasse entièrement automatisées et adaptées aux types de combustibles utilisés . Les installations de combustion individuelle de biomasse sont également utilisées dans les grandes installations pour la production de chaleur industrielle et de vapeur dans l'industrie ou comme installations de couplage chaleur-force (CCF) pour la production d'électricité. Les sous-produits de l'industrie de transformation du bois (par exemple, les sous-produits de sciage) sont souvent valorisés thermiquement sur place. Les excédents issus de la production d'électricité et de chaleur peuvent à leur tour être injectés dans les réseaux énergétiques existants.

**La production d'électricité** à partir de la biomasse peut se faire par combustion (turbines à vapeur, ORC) ou par gazéification (moteurs à gaz) dans des procédés à lit fixe ou à lit fluidisé. Si, à l'origine, la production d'électricité était principalement conçue pour les grandes installations (installations à partir de 400 kW), les installations de gazéification du bois dans le domaine des petites et très petites puissances sont désormais également commercialisées. Une exploitation écologique et économique nécessite impérativement une utilisation combinée de la chaleur produite lors de la production d'électricité et une utilisation thermique et électrique annuelle élevée.

Le gaz de synthèse produit lors de la gazéification du bois peut être utilisé non seulement pour la production combinée d'électricité et de chaleur, mais aussi pour la fabrication de carburants et d'autres produits chimiques, ou encore être injecté sous forme traitée dans les réseaux de gaz naturel. Selon la conception de l'installation et le mode d'exploitation, outre le gaz de bois, du charbon de bois ou de l'huile de pyrolyse peuvent également être produits comme sous-produits valorisables supplémentaires, ou du biochar comme puits de $CO_2$.

Quelle que soit la gamme de produits et la configuration des installations actuelles et futures destinées à l'utilisation du bois, la chaleur sera toujours un sous-produit qui devra être entièrement utilisé afin de garantir un fonctionnement efficace et économe en ressources des installations.

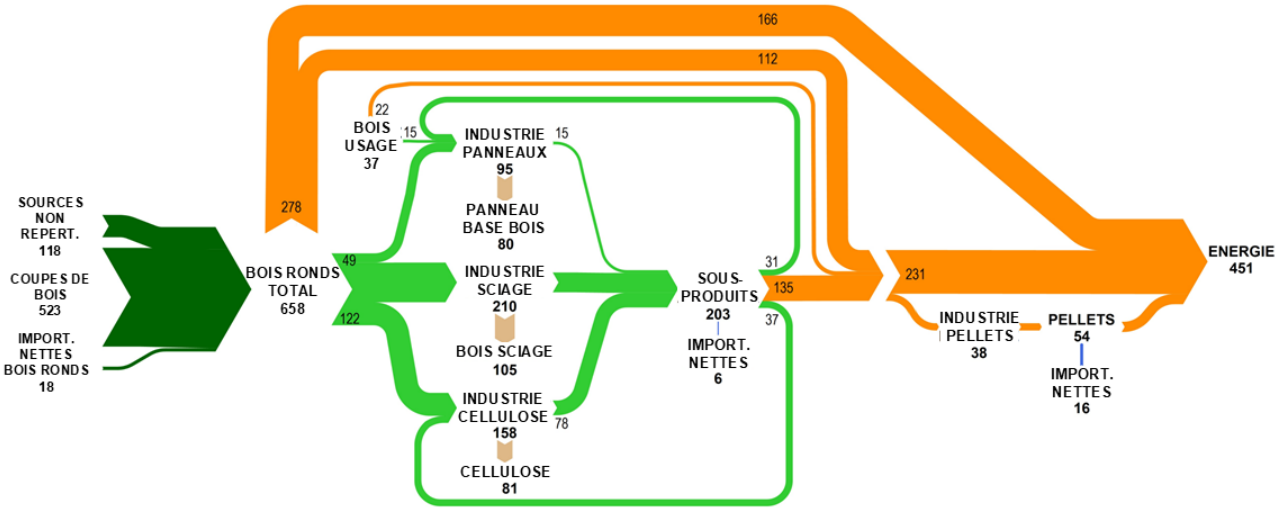



Figure 1.1 Diagramme du flux de bois pour le secteur forestier des 28 pays de l'UE en millions de mètres cubes solides (2015) ; données de base de l'illustration tirées de ([2], [3]).

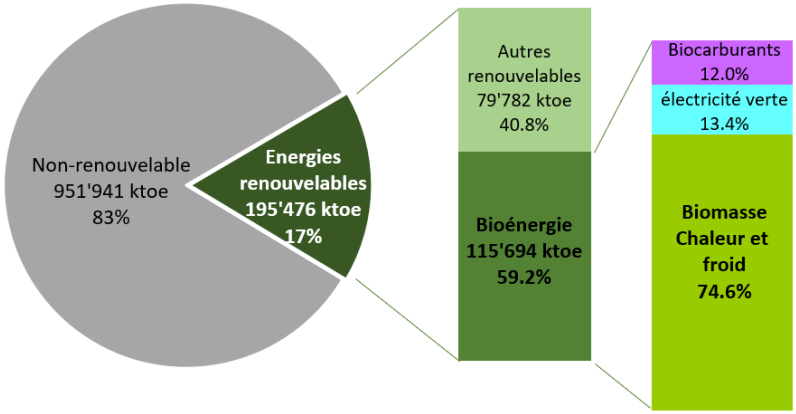



Figure 1.2 Part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie de l'UE en kilotonnes équivalent pétrole (ktoe) et en pourcentage, et ventilation de la contribution de la bioénergie (2016); données de base de l'illustration tirée de [4].

# 1.3 Le rôle du bois-énergie dans le système énergétique

## 1.3.1 Importance en comparaison internationale

En 2017, la consommation moyenne mondiale d'énergie primaire était d'environ 60 kWh par jour et par personne. Au sein des États membres de l'UE, cette valeur était nettement plus élevée en 2018, avec 100 kWh ([1], [5], [6], [7]). Même si la part des énergies renouvelables n'a cessé d'augmenter ces dernières années, environ 85 % de l'approvisionnement énergétique total de l'UE est toujours couvert par des ressources non renouvelables (Tableau 1.1). Dans la plupart des pays, l'énergie du bois, qui fait partie de la bioénergie, représente la plus grande part des énergies renouvelables (biomasse primaire solide). Elle joue un rôle important dans la transition vers un approvisionnement énergétique renouvelable, en particulier dans le secteur du chauffage, car ses propriétés sont celles qui se rapprochent le plus de celles des combustibles fossiles (densité thermique élevée, capacité de stockage, flexibilité). Au sein de l'UE, la Finlande, la Suède, la Lettonie, l'Estonie et l'Autriche enregistrent les plus fortes parts de bioénergie par rapport à leur population [4].

Tableau 1.1 Composition des sources d'énergie pour l'approvisionnement énergétique total dans le monde [5], dans l'UE et dans certains pays (2018) [1] ; données pour la Suisse tirées de [8].

* Valeur totale pour l'énergie éolienne, l'énergie solaire et autres

| Approvisionnement énergétique total en 2018 | Monde | UE-28 | DE | AT | CH | IT |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Total [TWh]** | **166'098** | **18'742** | **3'543** | **386** | **304** | **1'781** |
| **Énergies non renouvelables [%]** | **86,2** | **85,0** | **85,9** | **69,9** | **78,8** | **80,9** |
| **Énergies renouvelables [%]** | **13,8** | **15,0** | **14,1** | **30,1** | **21,2** | **19,1** |
| Bioénergie *[%]* | 9,3 | 9,0 | 8,5 | 16,7 | 7,4 | 8,7 |
| *biomasse primaire solide (y compris le bois) [%]* | - | *6,2* | *4,0* | 13,9 | 3,8 | 5,6 |
| Énergie hydraulique *[%]* | 2,5 | 1,9 | 0,5 | 9,8 | 12,3 | 2,7 |
| Énergie éolienne *[%]* | | 2,0 | 3,1 | 1,6 | 0,04 | 1,0 |
| Énergie solaire *[%]* | 2,0* | 0,9 | 1,5 | 0,9 | 0,9 | 1,4 |
| Autres *[%]* | | 1,2 | 0,5 | 1,1 | 0,6 | 5,2 |

Mais le bois-énergie occupe une place particulière non seulement sur le plan technique, mais aussi sur le plan économique. Alors que d'autres technologies renouvelables peuvent largement recourir à des sources d'énergie directes et gratuites (vent, soleil, eau, chaleur ambiante ou géothermique), la fourniture de combustibles bois nécessite des activités supplémentaires telles que la culture, la récolte, la transformation et le transport. La chaîne de valeur plus longue permet de créer durablement des emplois régionaux supplémentaires dans le domaine de l'approvisionnement en combustibles. Dans la comparaison mondiale des effets sur l'emploi des énergies renouvelables, la production d'énergie à partir de la biomasse solide occupe la sixième place avec 787'000 emplois créés en 2018 [9]. Dans l'UE, la production d'énergie à partir de biomasse solide occupait la première place en 2018. Avec 360'600 emplois dans le secteur de la biomasse solide (sur un total de 1,5 million d'emplois dans le secteur des énergies renouvelables), un chiffre d'affaires de 31,8 milliards d'euros a été généré [10].

## 1.3.2 Potentiel dans le système énergétique futur

De nombreuses études et stratégies énergétiques attribuent à la bioénergie (solide, liquide et gazeuse) un rôle clé en tant que substitut aux énergies fossiles. Cela s'explique principalement par le contenu énergétique, la capacité de stockage et la disponibilité flexible ainsi que la production essentiellement régionale de la biomasse. Du point de vue actuel, il semble improbable que la biomasse puisse couvrir entièrement les besoins énergétiques mondiaux sans entrer en conflit avec les objectifs en matière de biodiversité, de durabilité, de besoins en terres, en eau et en denrées alimentaires. La biomasse restera néanmoins un pilier essentiel de notre approvisionnement énergétique futur. Actuellement, la part mondiale de la bioénergie est d'environ 15'447 TWh/a (soit 9,3 % de l'approvisionnement énergétique total, voir Tableau 1.1). Selon une étude comparative de Faaij et al. [11], le potentiel mondial de bioénergie pour 2050 est estimé à un maximum de 139'000 TWh/a, mais les besoins énergétiques devraient également augmenter pour atteindre 222'000 à 417'000 TWh/a d'ici là. Le potentiel européen pour 2050 est quant à lui estimé à un maximum de 8'300 TWh/a. Ces chiffres doivent être considérés comme des valeurs indicatives, qui peuvent varier en fonction de la disponibilité régionale.

Même si le bois sera davantage utilisé à l'avenir pour la production de carburant, de gaz de bois ou de matières premières chimiques (mot-clé « bioéconomie »), le bois de chauffage restera un élément essentiel de l'approvisionnement en électricité et en chaleur renouvelables. Toutefois, comme le potentiel du bois ne suffira pas à assurer un approvisionnement énergétique entièrement renouvelable, il convient d'accorder une grande importance à l'efficacité des centrales de chauffage au bois et à une utilisation durable et économe en ressources du bois comme

source d'énergie. Dans le cas des installations de cogénération pour la production d'électricité et de chaleur, une utilisation complète de la chaleur et donc un fonctionnement basé sur la chaleur sont indispensables.

Pour parvenir à un approvisionnement en chaleur entièrement renouvelable, il sera également indispensable d'utiliser d'autres sources de chaleur régionales et renouvelables (énergie solaire thermique, géothermie, chaleur résiduelle et chaleur ambiante avec/sans pompes à chaleur). Les centrales de chauffage au bois et les réseaux de chauffage à distance constituent un point de départ idéal pour intégrer ces sources de chaleur et les rendre exploitables. Comme cela conduit dans tous les cas à des configurations d'installations plus complexes et à des interactions entre différentes sources de chaleur, il est d'autant plus important d'accorder une grande attention à une planification complète et détaillée, en tenant particulièrement compte des exigences des différents producteurs de chaleur et de leur interaction efficace et à faibles émissions.

## 1.4 Mesures de promotion pour le bois-énergie

Afin de favoriser une transition rapide vers un approvisionnement énergétique entièrement renouvelable et de compenser des conditions-cadres défavorables (par exemple, l'absence ou le niveau trop bas des prix du $CO_2$), les installations de production bois-énergie sont subventionnées dans de nombreux pays. Les mesures d'encouragement les plus courantes au sein de l'UE sont les suivantes [12]:

- Aides à l'investissement (subventions non remboursables, prêts à taux réduit)
- Tarifs de rachat (prix fixes)
- Primes d'alimentation (majoration des prix du marché, subventions d'exploitation)
- Exonérations ou allègements fiscaux
- Remboursement d'impôt
- Réglementations légales (par exemple, échange de quotas d'émission de $CO_2$, exigences en matière de part renouvelable, tarification du $CO_2$)

Dans le secteur de l'électricité, ce sont principalement les tarifs d'achat et les primes d'alimentation qui sont utilisés, mais aussi de plus en plus les rémunérations uniques, tandis que dans le secteur du chauffage, ce sont les aides à l'investissement qui dominent. En revanche, les avantages fiscaux sont plutôt rares. Depuis l'accord de Paris sur le climat de 2015, de plus en plus de dispositions légales visant à promouvoir les énergies renouvelables ont été adoptées. Il s'agit notamment de l'abandon du fioul, du gaz naturel et du charbon ou de l'obligation d'utiliser une certaine proportion d'énergies renouvelables dans la construction de logements. Au total, le secteur de la bioénergie a été subventionné à hauteur d'environ 14 milliards d'euros par l'UE et ses États membres en 2018 (73 milliards d'euros au total pour les énergies renouvelables) [13]. Environ 8 % du total des subventions accordées dans le domaine de l'énergie au sein de l'UE sont consacrés à la biomasse, tandis que plus de 30 % (soit 50 milliards d'euros) continuent d'être consacrés aux énergies fossiles.

Selon les pays, les aides concernent la construction, l'extension et l'optimisation ou la rénovation de centrales de chauffage à la biomasse et des réseaux de chauffage à distance et à distance associés, ainsi que les installations individuelles à biomasse commerciales et privées. Les taux d'aide à l'investissement sont souvent de l'ordre de 20 % à 40 %. Les conditions d'éligibilité courantes axées sur le secteur du chauffage sont les suivantes :

- Part minimale d'énergies renouvelables dans l'ensemble du système
- Efficacité de la chaudière, du réseau de chauffage et du système global (par exemple, critères de référence pour le rendement de la chaudière, les pertes du réseau)
- Densité de raccordement suffisante du réseau de distribution
- Température de retour maximale autorisée
- Économie minimale de $CO_2$
- Normes d'émission plus strictes que celles prescrites par la loi
- Passage des énergies fossiles aux énergies renouvelables
- Combinaison avec la rénovation thermique des bâtiments
- Gestion de la qualité QM Chauffages au bois (www.qm-chauffages-bois.ch)
- Autres exigences en matière d'assurance qualité

Des informations actuelles et détaillées sur les possibilités de subvention et les modalités de traitement des demandes peuvent être obtenues auprès des organismes nationaux et régionaux compétents.

L'introduction de prix nationaux/internationaux du $CO_2$, déjà mise en œuvre dans certains pays, constitue un complément et une alternative efficaces aux subventions pour accélérer la transition vers un approvisionnement durable en chaleur renouvelable à partir de la biomasse et d'autres sources d'énergie renouvelables.

# 2 QM Chauffages au bois

## 2.1 Origine et objectif

La Suisse, le Bade-Wurtemberg, la Bavière et l'Autriche ont créé conjointement des normes de qualité pour les centrales de chauffage au bois et les proposent depuis 2004 sous le nom « QM Chauffages au bois / QM Holzheizwerke ». L'accent est mis sur la conception, la planification et la réalisation professionnelles de l'installation de production de chaleur et du réseau de chaleur. Les critères de qualité importants sont une sécurité de fonctionnement élevée, une régulation précise et de bonnes propriétés en matière d'hygiène de l'air. L'objectif est d'assurer un fonctionnement économe en énergie, respectueux de l'environnement et rentable de l'ensemble de l'installation.

QM Chauffages au bois est un système de gestion de la qualité lié à des projets. Il garantit que la qualité requise est définie et contrôlée dans le cadre d'un projet limité dans le temps auquel participent plusieurs entreprises.

## 2.2 Pourquoi le QM Chauffages au bois ?

Les installations de chauffage au bois, en particulier celles équipées de réseaux de chaleur, sont des entreprises à long terme qui nécessitent des investissements élevés et des délais d'amortissement longs. Les risques sont donc élevés. Il est souvent difficile de prévoir l'évolution de la demande, car l'activité de construction, tant dans le domaine des nouvelles constructions que dans celui de la rénovation, est soumise à de fortes fluctuations. Les prévisions concernant la situation énergétique future, qui connaît actuellement une transition vers une production de chaleur renouvelable et sans énergie fossile, sont tout aussi délicates.

Une gestion de projet professionnelle est donc une condition indispensable pour réaliser et exploiter avec succès une grande centrale de chauffage au bois avec réseau de chaleur. La gestion de la qualité, présentée sous la forme d'un document dans lequel les exigences de qualité et les responsabilités sont définies avant la réalisation de l'installation (plan qualité), et l'examen de la rentabilité, par exemple à l'aide d'un business plan, font partie intégrante de la gestion de projet. Ils garantissent la construction d'installations qui, pour un faible coût d'investissement, atteignent un rendement annuel élevé, peuvent être exploitées avec peu d'entretien et de faibles émissions et offrent une grande sécurité d'approvisionnement.

Par conséquent, QM Chauffages au bois est particulièrement adapté à une combinaison avec des subventions pour les centrales de chauffage au bois et les réseaux de chaleur. Seule une combinaison ciblée de subventions et d'exigences de qualité permet de garantir une utilisation efficace et durable à long terme des fonds de subvention. En Autriche, par exemple, l'application de QM Chauffages au bois est obligatoire pour obtenir une aide à l'investissement. L'application du QM Chauffages au bois en combinaison avec des subventions a été qualifiée de « procédure particulièrement recommandée » par la Cour des comptes européenne [14].

QM Chauffages au bois propose différentes procédures d'assurance qualité (Figure 2.1) qui peuvent être utilisées, en fonction de la taille et de la complexité, pour la construction d'une nouvelle centrale de chauffage, d'un réseau de chaleur, le remplacement des chaudières d'une centrale de chauffage ou l'extension d'un réseau de chaleur :

- **QMstandard®**
  La procédure standard comprend cinq étapes (MS1 à MS5) couvrant l'ensemble du processus de planification et de réalisation.
- **Version simplifiée de QMstandard®**
  Sous certaines conditions, la version simplifiée ne comprend que trois des cinq étapes au sein de la planification et de la réalisation.
  Lors du remplacement d'une chaudière à bois ou de l'extension d'un réseau de chaleur, des exigences simplifiées peuvent également être appliquées dans le cadre de certaines étapes.
- **QMmini® (QMcompact)**
  Cette procédure fortement simplifiée se déroule en deux phases et ne peut être appliquée qu'aux installations sans chaudière d'appoint à combustible fossile dans la plage de puissance spécifiée conformément à la Figure 2.1.

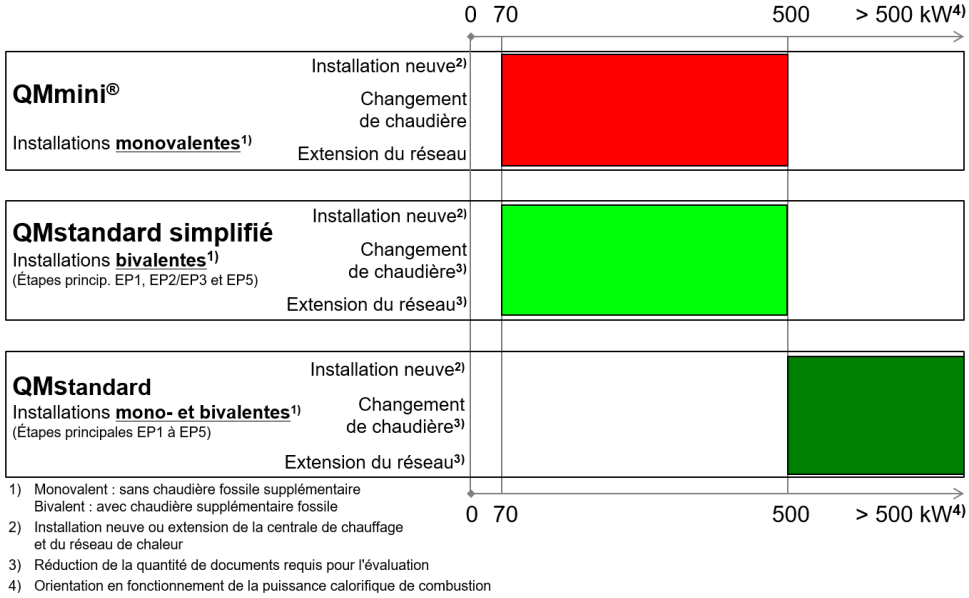



Figure 2.1
Orientation générale pour l'application de QMstandard® et QMmini® en Suisse sur la base de la puissance calorifique de combustion.

1) Monovalent : sans chaudière fossile supplémentaire
Bivalent : avec chaudière supplémentaire fossile
2) Installation neuve ou extension de la centrale de chauffage et du réseau de chaleur
3) Réduction de la quantité de documents requis pour l'évaluation
4) Orientation en fonctionnement de la puissance calorifique de combustion

Sur la base de valeurs empiriques, QM Chauffages au bois a défini des exigences de qualité (**exigences Q**). Les plus importantes concernent l'évaluation de la situation, la conception du réseau de chaleur et de la production de chaleur, la gamme de combustibles et l'optimisation de l'exploitation.

La mise en œuvre d'une **optimisation** systématique **du fonctionnement** après la mise en service de l'installation est un élément intégrant et indispensable de l'assurance qualité avec QM Chauffages au bois. Au cours de la première année de fonctionnement, les données d'exploitation les plus importantes doivent être enregistrées et évaluées pour différents états de fonctionnement. Elles constituent la base permettant de vérifier si l'installation répond aux exigences de qualité (exigences Q) convenues au début du projet (voir chapitre 16).

## 2.3 QMstandard®

### 2.3.1 Personnes clés

Les personnes les plus importantes pour l'assurance qualité avec la procédure QM Chauffages au bois sont :

- Le **maître d'ouvrage** ou un représentant mandaté détermine la norme de qualité et est responsable de la rentabilité du projet.
- Le ou les responsables qualité (**responsables Q)** veillent à ce que le système de gestion de la qualité « QM Chauffages au bois » soit défini, mis en œuvre et maintenu. Dans cet objectif, le ou les responsables Q conseillent le maître d'ouvrage et le planificateur principal. Leurs activités comprennent la planification, le contrôle et la vérification de la qualité.
- **Le planificateur principal** est responsable envers le maître d'ouvrage de la qualité de l'ensemble de l'installation (chaufferie à bois et réseau de chaleur) dans le cadre des prestations de planification définies dans le contrat d'ingénierie. Pour une conception conforme à QM Chauffages au bois, il est obligatoire de désigner un planificateur principal.

### 2.3.2 Tâches et responsabilités

Dans le déroulement habituel d'un projet, le **maître d'ouvrage** ou son représentant assume les tâches suivantes:

- Nomination du responsable qualité et nomination du planificateur principal. Mise en place du QM Chauffages au bois (système de gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois) - si possible le plus tôt possible.
- Organisation du projet avec des structures organisationnelles claires et des responsabilités et compétences précisément définies dans tous les domaines d'activité.
- Organisation et forme juridique de l'organisme responsable (société d'exploitation) de la centrale de chauffage au bois.
- Preuve de rentabilité, par exemple à l'aide d'un business plan.
- Garantie du financement.
- Approbation des documents présentés par les participants au projet.
- Obtention des autorisations administratives et des droits de passage nécessaires.

Le ou les **responsables qualité** doivent remplir les tâches suivantes:

- Toutes les tâches administratives liées à la gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois : mise en place du système de gestion de la qualité en collaboration avec le maître d'ouvrage et le planificateur principal, organisation des réunions nécessaires, préparation des documents requis par la gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois.
- Planification de la qualité : définition claire des exigences de qualité dans le plan qualité (plan Q) en collaboration avec le maître d'ouvrage et le planificateur principal ; vérification que les exigences de qualité énoncées dans le plan Q sont conformes aux règles techniques reconnues.
- Contrôle qualité : vérifier à chaque étape si tous les documents et toutes les données sont disponibles et si les exigences de qualité convenues dans le plan qualité se situent dans les limites de tolérance convenues.
- Contrôle de la qualité : s'assurer que les écarts de qualité sont détectés et corrigés à temps ; si des écarts de qualité sont constatés, le ou la responsable qualité doit rechercher, en collaboration avec le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre, des solutions pour résoudre les problèmes.

Le ou la responsable qualité n'assume aucune responsabilité juridique pour l'installation réalisée. Celle-ci incombe au planificateur principal et aux fabricants dans le cadre de leurs mandats et sous leur responsabilité finale vis-à-vis du maître d'ouvrage.

**Le planificateur principal** est responsable de la qualité de la centrale de chauffage au bois vis-à-vis du maître d'ouvrage dans le cadre des prestations de planification définies dans le contrat d'ingénierie. La qualité requise est définie dans le plan qualité de QM Chauffages au bois en six domaines partiels:

- Analyse de la situation
- Réseau de chaleur
- Production de chaleur
- Documentation de l'installation
- Réception
- Optimisation de l'exploitation

### 2.3.3 Déroulement de la planification avec étapes clés

La **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** donne un aperçu du déroulement du QM Chauffages au bois et des étapes de planification. Le guide qualité (guide Q) décrit en détail le déroulement et les étapes de planification (voir chapitres 2.3.4 et [15]).

Le ou les responsables qualité sont désignés par le maître d'ouvrage et assument la responsabilité de la mise en œuvre de la gestion de la qualité des installations de chauffage au bois. Le ou la planificateur/planificatrice principal(e) est également désigné(e) par le MO et est responsable de la planification globale de l'installation. Ensemble, ils consignent les exigences de qualité dans le document principal du plan qualité (étape MS1). Le processus de planification

est généralement divisé en cinq phases de projet. Dès la phase d'étude préliminaire, le jalon 1 QM Chauffages au bois est établi afin de pouvoir commencer la planification de la qualité (planification Q) le plus tôt possible. Les jalons 2, 3 et 4 servent ensuite au contrôle qualité (contrôle Q) et à la gestion de la qualité (gestion Q) pendant le déroulement du projet. Cela permet de garantir que les écarts de qualité sont détectés et corrigés à temps. Le jalon 5, après au moins un an d'optimisation de l'exploitation, marque la fin de la gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois.

Dans le détail, le déroulement et l'application du QM Chauffages au bois peuvent être adaptés aux conditions locales dans chaque pays afin d'être en conformité avec les procédures de planification et de subventionnement habituelles. Cela peut par exemple impliquer l'adaptation des domaines d'application et des désignations du QMstandard, de sa version simplifiée, du QMmini, ou encore l'adaptation ou le complément de certains documents ou critères de qualité. Les adaptations spécifiques à chaque pays ne sont pas abordées plus en détail ici. Les interlocuteurs nationaux respectifs du QM Chauffages au bois peuvent fournir de plus amples informations à ce sujet.

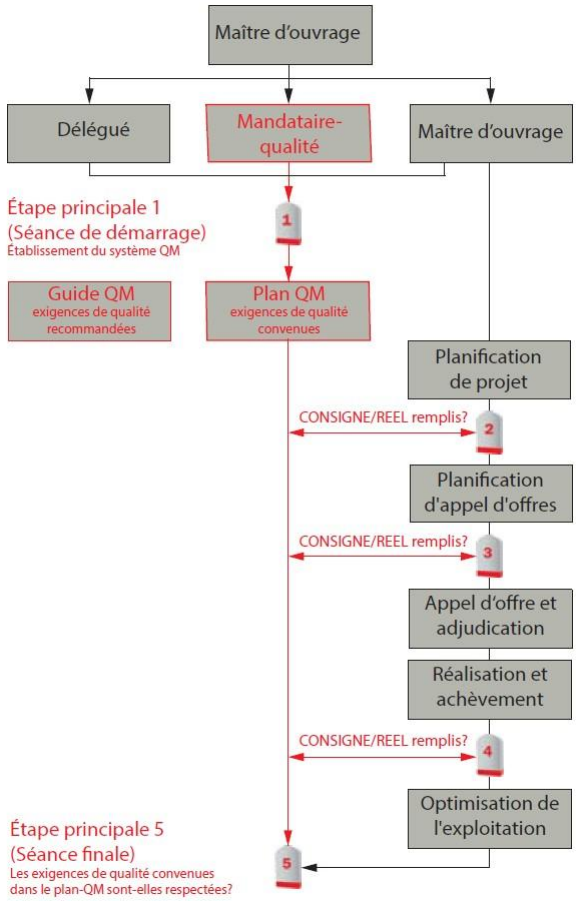



Figure 2.2 Déroulement du QM Chauffages au bois

### 2.3.4 Plan Q

QM Chauffages au bois doit fonctionner avec le moins de documents et de charges administratives possible. Le document central est le plan Q, qui se compose de deux parties:

- Le document principal, qui est créé lors de la mise en place du QM Chauffages au bois à l'étape 1. Avant la réalisation de l'installation, les exigences de qualité et les responsabilités spécifiques au projet sont convenues et définies ici.
- Le document complémentaire avec un tableau EXCEL, qui est créé à chaque étape franchie du QM Chauffages au bois. Le document complémentaire sert au contrôle et à la gestion de la qualité pendant le déroulement du projet.

### 2.3.5 Guide qualité

Le guide qualité [15] fait partie intégrante du plan qualité. Il décrit le déroulement du QM Chauffages au bois. Il décrit également en détail les exigences de qualité qui doivent être satisfaites aujourd'hui pour la planification et la construction d'une centrale de chauffage au bois avec réseau de chaleur. Le guide qualité et le plan qualité (document principal) ont la même structure, ce qui permet d'utiliser les deux documents en parallèle de manière très simple et pratique:

A. Participants au projet

B. Mise en place de la gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois

C. Déroulement du projet avec les étapes importantes

D. Prestations du maître d'ouvrage

E. Prestations et exigences de qualité du planificateur principal

F. Définition du combustible

L'annexe du guide qualité de l'Association autrichienne pour la qualité dans le secteur du bois [15] contient les informations supplémentaires suivantes :

- Réglementations spécifiques pour l'Autriche
- Vitesses d'écoulement maximales pour les conduites de transport
- Graphiques :
  - Pertes de distribution de chaleur en fonction de la densité de raccordement
  - Coûts spécifiques de la production de chaleur
  - Coûts spécifiques de la distribution de chaleur
- Exigences en matière de production de chaleur (tableau récapitulatif)
- Charge de chauffage journalière minimale pour un fonctionnement à faible charge
- Listes de contrôle pour les étapes MS1 à MS5 selon la norme QM. D'autres listes de contrôle sont disponibles pour le remplacement des chaudières et l'extension du réseau.
- Document principal et complémentaire du plan Q (modèle)

### 2.3.6 Outils pour les planificateurs

QM Chauffages au bois met à disposition d'autres outils de planification pour les planificateurs. Les plus importants sont:

- **Solution standard:** recueil de solutions éprouvées pour différentes variantes de production de chaleur. Ils contiennent des documents détaillés tels que des schémas de principe avec la désignation et l'emplacement des points de mesure, la conception hydraulique des circuits de chaudière, une description fonctionnelle des différents circuits de régulation avec schéma de régulation, une liste des points de mesure pour l'optimisation du fonctionnement et des spécifications pour l'enregistrement des données. Ils contiennent également des informations sur la conception de la conduite à distance et la régulation des pompes de conduite à distance. Le planificateur dispose de documents Word sur les différentes solutions standards, qui peuvent être complétées et adaptées en fonction du projet.
- **Modèle d'appel d'offres** pour les installations avec une ou deux chaudières à bois: le planificateur dispose d'un document Word comme modèle d'appel d'offres, qui contient les éléments essentiels d'un appel d'offres et qui doit être complété et adapté en fonction du projet.
- **Manuel de planification** (disponible): il offre une description détaillée du processus de planification et de l'état de la technique pour les centrales de chauffage au bois avec réseaux de chaleur. Il décrit en outre les exigences pour un fonctionnement optimal d'une telle installation et fournit des connaissances de base pour tous les aspects importants de la planification et pour les principaux composants de l'installation.
- **Listes de contrôle** pour les étapes MS1 à MS5 selon la norme QM (guide Q [15]) : elles décrivent les documents à fournir pour chaque étape. Listes de contrôle pour les nouvelles installations, le remplacement de chaudières et l'extension du réseau.
- Tableau Excel **pour l'évaluation de la situation:** l'outil permet de vérifier la plausibilité des données de base des consommateurs de chaleur (besoins annuels en chaleur, besoins en puissance, surface de référence énergétique). Les conditions climatiques du site de l'installation ainsi que la longueur et les pertes de chaleur de la conduite à distance sont prédéfinies. Sur cette base, l'outil permet dès le début du projet une première conception de la production et de la distribution de chaleur et vérifie le respect des principales exigences de qualité. Au fur et à mesure de l'avancement de la planification, les données sont mises à jour et vérifiées à nouveau à chaque étape importante (voir chapitre 11).
- **Outil de conseil pour la rénovation des installations de chauffage au bois:** l'outil de conseil pour la rénovation des installations de chauffage au bois est un fichier Excel [16]. Il permet de saisir les données spécifiques à l'installation les plus importantes pour l'évaluation. Une fois les données saisies, l'utilisateur obtient une analyse sommaire grâce à une évaluation automatique des données avec des benchmarks. L'outil permet de formuler des recommandations et de renvoyer vers d'autres outils et informations complémentaires. Il est mis gratuitement à la disposition des planificateurs, des conseillers et des exploitants d'installations.
- Outil Excel **de calcul de rentabilité** (CH): il sert à établir un bilan prévisionnel et un compte de résultat prévisionnel sur une durée d'exploitation de l'installation de 25 ans. Cet outil permet de déterminer à un stade précoce les modèles tarifaires et l'évolution des coûts sur la durée du projet, les goulots d'étranglement économiques et la réussite du projet (voir chapitre 106).
- **FAQ:** le groupe de travail QM Chauffages au bois met à disposition sur son site web [17] des informations spécifiques complémentaires sur les questions techniques fréquentes (FAQ).

L'assurance qualité avec QM Chauffages au bois nécessite l'échange et la mise à jour constante d'informations et de documents au cours du projet. Dans le cas le plus simple, cela peut se faire par courriel et sur papier. Une alternative utile peut être une solution cloud simple avec une structure de dossiers standardisée et des droits d'accès spécifiques, où sont stockés les documents relatifs à la gestion de la qualité d'un projet.

**La base de données comme outil pour le déroulement du projet**

En Autriche, en raison du grand nombre de projets QM, une base de données avec interface web a été développée pour gérer l'ensemble du processus QM. Cela garantit que tous les participants au projet ainsi que les organismes de financement fédéraux et régionaux ont accès aux mêmes informations et documents, ce qui facilite l'ensemble de la communication et le traitement QM:

- Point d'accès central pour tous les participants au projet (maître d'ouvrage, entreprise de planification, responsables qualité, organismes de financement, gestion qualité supérieure)
- Droits d'accès spécifiques par projet
- Attribution des rôles et autorisations spécifiques conformément au guide qualité pour les maîtres d'ouvrage, les planificateurs principaux et les responsables qualité
- Représentation et documentation complètes de l'ensemble du processus de gestion de la qualité, y compris la protection en écriture à la fin des étapes importantes
- Fonction de téléchargement et de chargement pour tous les documents
- Notifications automatiques à la fin des étapes importantes
- Téléchargement et évaluation automatisée des rapports d'exploitation annuels
- Permet une évaluation globale des progrès en matière de qualité des centrales de chauffage au bois et des réseaux de chaleur enregistrés
- Lien direct avec le traitement des subventions
- Base de données importante pour les organismes de financement, les responsables politiques et les autorités administratives

## 2.4 QMmini

### 2.4.1 Domaine d'application

QMmini a été développé en complément de QMstandard pour les installations d'une puissance comprise entre 100 kW et 500 kW environ. Il est commercialisé depuis 2011. Afin d'atteindre les mêmes objectifs de qualité avec moins d'efforts de contrôle, son champ d'application est non seulement limité en termes de puissance, mais également restreint aux systèmes simples avec des installations monovalentes, c'est-à-dire aux installations équipées d'une ou plusieurs chaudières à bois. QMmini peut également être utilisé pour des installations existantes, par exemple lors du remplacement d'une chaudière à bois existante ou de l'extension du réseau de chaleur existant.

La Figure 2.1 montre le domaine d'application et la distinction entre QMmini et QMstandard.

### 2.4.2 Déroulement

QMmini se déroule en deux phases. Dans la phase 1, la conception de l'installation est vérifiée dans le formulaire de projet QMmini. Dans la phase 2, comme pour le jalon MS5, divers documents et informations sur le comportement opérationnel de l'installation sont vérifiés et consignés dans le rapport final QMmini.

### 2.4.3 Documents et outils

QMmini met à la disposition des planificateurs et des installateurs suisses les outils suivants, téléchargeables:

- Déroulement du projet Accompagnement qualité QMmini
- Guide d'accompagnement qualité QMmini
- Formulaire de projet QMmini avec exemple (sous Excel).

En Autriche, une procédure similaire est proposée pour les « installations de chauffage à distance » de moins de 400 kW sous le nom de qm:kompakt.

# 3 Développement du projet

## 3.1 De l'idée au kilowattheure

Au début de chaque projet bois-énergie, il y a une idée. Celle-ci peut avoir des origines très diverses :

- Bons exemples
- Objectifs de politique climatique
- Remplacement imminent des systèmes de chauffage fossiles (par exemple dans les bâtiments publics)
- Problèmes de vente pour les assortiments de bois de qualité inférieure
- Mandat politique
- Prescriptions en matière d'aménagement du territoire (p. ex. plan directeur énergétique)
- Associations professionnelles, agences de l'énergie, bureaux d'études

L'expérience montre que le chemin « de l'idée au kilowattheure de chaleur ou d'électricité » est long et que souvent, seule une petite partie de toutes les idées aboutit directement à la construction d'une installation. Parfois, une idée nécessite plusieurs tentatives avant que le moment soit venu de mettre en œuvre le projet. Le défi consiste d'une part à disposer suffisamment tôt et sans trop d'efforts des bases permettant de décider entre la poursuite du développement et l'abandon du projet. D'autre part, lorsque la décision est prise de poursuivre le développement du projet, une phase de planification complexe commence. Le défi consiste ici à mener à bien le projet engagé sans l'abandonner par la suite. Vous trouverez un aperçu du déroulement du développement du projet selon QM Chauffages au bois dans le guide qualité [15].

Entre l'idée et la mise en service de l'installation, il s'agit avant tout de discuter des questions **techniques et économiques** et d'y trouver des réponses. Mais surtout dans la phase initiale du projet, il faut également tenir compte des aspects **non techniques.** Tout projet bois-énergie d'envergure déclenche des processus interpersonnels, que ce soit lors de la création d'une société d'exploitation, de l'acquisition de consommateurs de chaleur ou de la vente de chaleur. La bonne gestion de ces processus peut parfois être tout aussi difficile et décisive pour la réussite du projet que le choix de la technologie appropriée pour l'installation.

La phase initiale du projet est déterminante pour la mise en place du QM Chauffages au bois. Plus les normes et recommandations de QM Chauffages au bois sont intégrées tôt dans le projet, plus leur mise en œuvre est facilitée.

Différentes personnes et différentes parties prenantes sont impliquées dans le développement d'un projet bois-énergie (voir Figure 3.1). Elles ont non seulement des intérêts divergents, mais aussi des perspectives et des attentes différentes. Il est essentiel de les réunir de manière constructive.

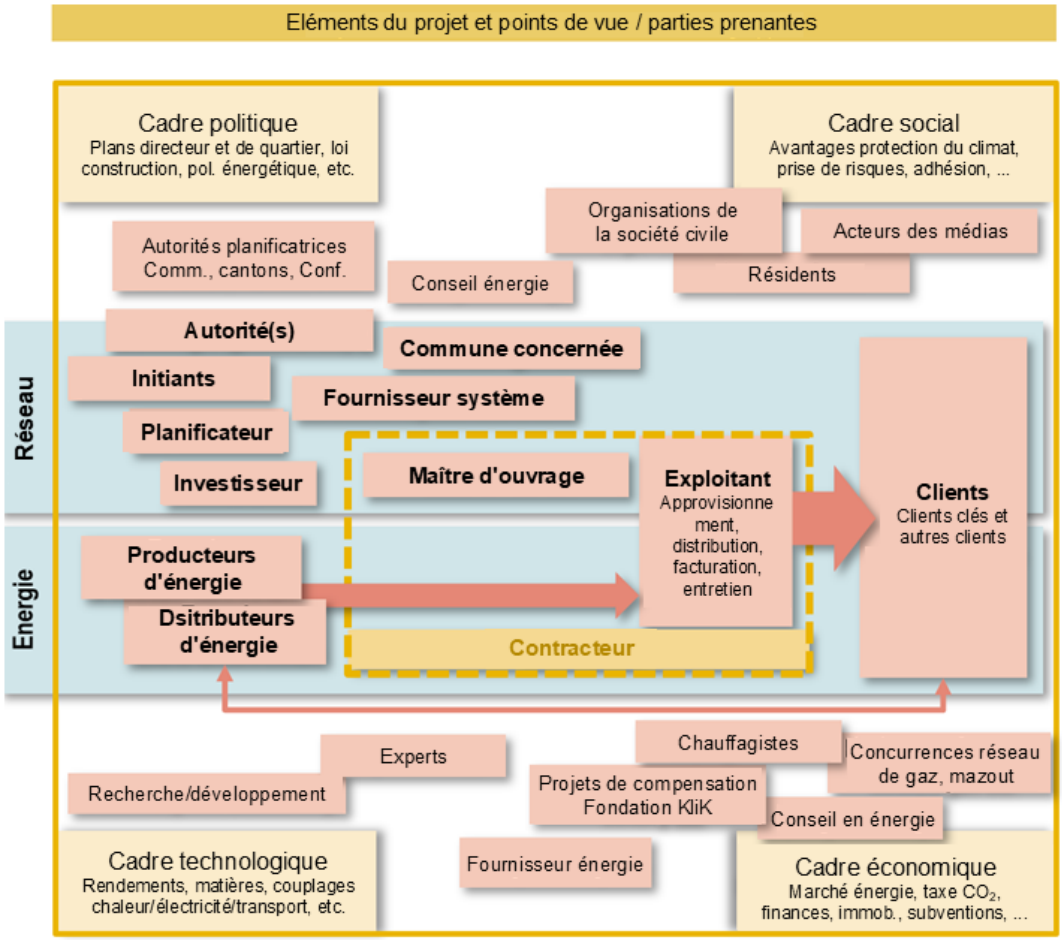



Figure 3.1 Éléments du projet et points de vue des différentes parties prenantes [18].

## 3.2 Étude de faisabilité

La décision de principe de poursuivre ou d'abandonner une idée repose généralement sur une étude de faisabilité (également appelée étude préliminaire, analyse sommaire, planification préliminaire, préparation du projet et de la planification, etc.). L'étude de faisabilité sert à établir des bases solides pour décider si un projet sera mis en œuvre ou non.

Les installations de production d'énergie à partir du bois étant des projets d'infrastructure à long terme nécessitant un investissement initial élevé, l'étude de faisabilité revêt une grande importance et doit donc être exhaustive et réalisée par des spécialistes. Elle ne comprend pas de planification détaillée ou d'exécution et ne peut en aucun cas les remplacer.

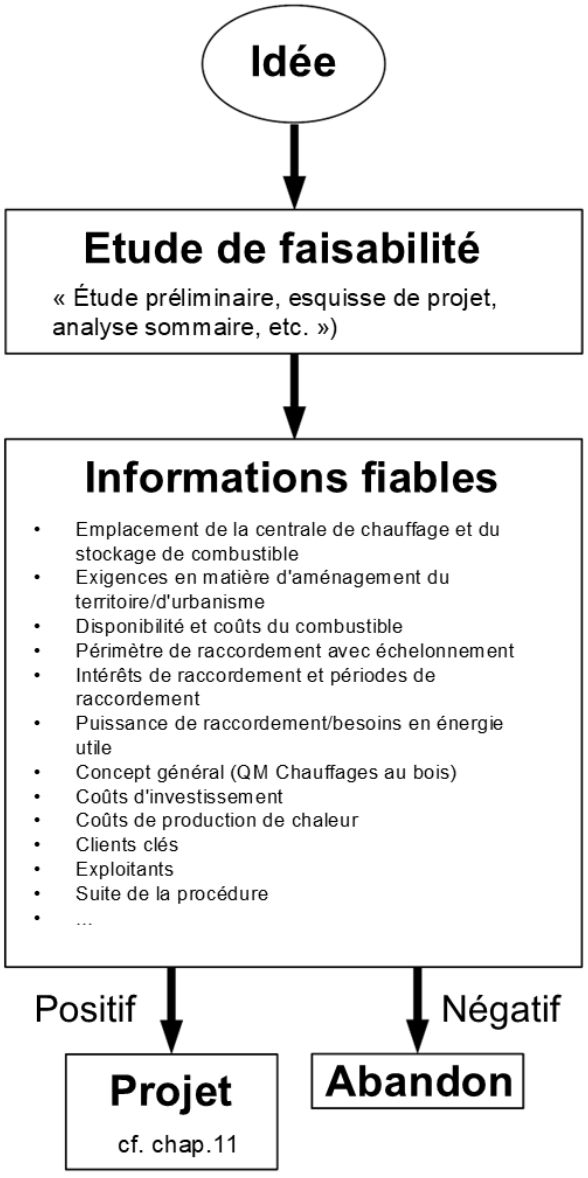



Figure 3.2 Intégration de l'étude de faisabilité dans le développement du projet.

L'étude de faisabilité est généralement réalisée à un moment où, dans de nombreux cas, il n'existe encore aucune société d'exploitation (organisme responsable) et où la mise en œuvre ultérieure du projet n'est en aucun cas garantie. Son financement représente donc souvent un défi. Si des communes ou des entreprises d'approvisionnement en énergie sont impliquées dans le projet, elles peuvent prendre en charge le financement. Il est souvent possible de faire appel à des services de conseil peu coûteux proposés par des associations professionnelles, des agences de l'énergie, etc. pour soutenir la phase initiale de développement du projet. Parfois, ce sont les bureaux d'études qui sont à l'origine d'une idée de projet et qui avancent les fonds. En fonction des conditions spécifiques à chaque pays, une participation ou un soutien financier de la part de l'État fédéral, des Länder/cantons ou d'autres organismes est également possible.

La Figure 3.2 montre les questions à clarifier dans le cadre d'une étude de faisabilité afin de pouvoir prendre une décision de principe. Celles-ci doivent toutefois toujours être définies au cas par cas. Le développement du projet et la suite du processus de planification peuvent être soutenus par une analyse des risques afin d'identifier et de prendre en compte les risques à un stade précoce.

### 3.2.1 Emplacement de la centrale de chauffage et du stockage de combustible

En raison de l'activité intense dans le secteur de la construction et de l'extension des zones résidentielles dans de nombreux endroits, il est de plus en plus difficile de trouver des emplacements appropriés pour les centrales de chauffage et les entrepôts de combustible. Les emplacements idéaux sont donc les zones commerciales et industrielles, les centrales existantes pouvant être agrandies ou le regroupement de deux ou plusieurs centrales de chauffage existantes. Pour que le projet soit accepté, il est avantageux d'évaluer plusieurs emplacements dès la phase d'étude de faisabilité. L'évaluation des emplacements possibles pour la centrale de chauffage et le stockage de combustible est donc l'une des premières et des plus importantes tâches dans le cadre du développement du projet et doit être abordée le plus tôt possible. Cela s'explique également par le fait qu'aujourd'hui, de plus en plus de personnes font usage de leur droit d'opposition. Plus l'installation doit être grande, plus cet aspect est important. Si aucun site ne peut être trouvé, la clarification des autres questions peut devenir obsolète. Les critères les plus importants pour l'évaluation du site sont les suivants :

- L'espace disponible et les infrastructures existantes (électricité, eau, égouts, télécommunications, etc.)
- Accès approprié pour la livraison de combustible (par exemple, éviter les accès à travers des zones résidentielles, des cours d'école, etc.)
- Sécurité d'approvisionnement en combustible et en moyens d'exploitation
- Topographie (p. ex. emplacement défavorable au pied de versants habités)
- Direction du vent
- Régime foncier
- Proximité de la zone d'approvisionnement (éviter les longues conduites de chauffage à distance).

### 3.2.2 Exigences en matière d'aménagement du territoire et d'urbanisme

Dans le cadre de l'évaluation du site, il convient également de vérifier la conformité du site prévu avec les conditions-cadres spécifiques au pays et à la localité en matière d'aménagement du territoire. Les sites situés dans des zones agricoles ou forestières nécessitent des procédures d'autorisation et de changement d'affectation (procédures de reclassement) strictes, spécifiques à chaque pays. Le temps nécessaire à ces procédures doit être pris en compte dans le développement du projet.

### 3.2.3 Disponibilité du combustible

La régionalité est un argument important pour le développement de projets bois-énergie. C'est pourquoi la disponibilité régionale et la sécurité d'approvisionnement en combustible doivent être clarifiées à un stade précoce. Cela inclut notamment la qualité et les coûts. Il est souvent judicieux de conclure des contrats préliminaires avec des fournisseurs de combustible potentiels. Pour les grandes centrales de chauffage au bois, il est recommandé de clarifier l'approvisionnement en combustible dans le cadre d'études approfondies (voir chapitre 4).

### 3.2.4 Périmètre de raccordement et intérêt pour le raccordement

La densité de consommation de chaleur ou la densité de raccordement (voir chapitre 12**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) permet de définir sans trop d'efforts un premier périmètre de raccordement provisoire. Idéalement, celui-ci regroupe des gros consommateurs (clients clés) intéressés par un raccordement, qui constituent la structure du réseau de chaleur. L'intérêt pour le raccordement dans l'environnement des clients clés est déterminé à l'aide d'une enquête, s'il n'est pas encore connu. Les informations les plus importantes sont les suivantes :

- Intérêt fondamental pour le raccordement
- Date de raccordement prévue
- Consommation finale moyenne d'énergie jusqu'à présent
- Âge de l'installation de chauffage existante
- Extensions ou rénovations techniques prévues du bâtiment.

La question relative à l'intérêt de principe pour le raccordement est posée dans un premier temps sans indication de prix fermes pour le chauffage, car ceux-ci ne peuvent être déterminés en détail qu'à partir d'un certain stade de développement du projet. Les réponses sont donc sans engagement et peu significatives. La décision de raccordement dépend en premier lieu des coûts de production de chaleur. Ceux-ci dépendent fortement du nombre, de la puissance de raccordement et de la date de raccordement des immeubles concernés. Les clients clés jouent donc un rôle important. La procédure détaillée est également décrite dans le Guide de planification Chauffage à distance [19].

Les résultats de l'enquête permettent de déterminer des valeurs indicatives pour la puissance raccordée et les besoins en énergie utile et d'établir un premier relevé de situation (voir chapitre 10.5).

### 3.2.5 Concept général

Il est recommandé d'élaborer très tôt un premier concept général de l'installation. Cela permet de s'assurer que les normes et les exigences de QM Chauffages au bois d'une part, et les prescriptions légales applicables (p. ex. protection de l'air, élimination des cendres) d'autre part, sont prises en compte dès le début.

### 3.2.6 Coûts d'investissement et coûts de production de chaleur

L'estimation des coûts d'investissement et de production de chaleur se fait sur la base d'offres, d'expériences et de valeurs indicatives. Les coûts de production de chaleur permettent de concrétiser les intérêts de raccordement non contraignants déclarés lors du premier relevé des besoins en chaleur afin de réinterroger les clients potentiels sur leur intérêt.

Dans la pratique, les réunions d'information se sont avérées efficaces à cet égard. Les riverains ont participé à l'enquête et attendent ensuite des informations sur les résultats. Parallèlement, ces réunions servent à acquérir de nouveaux clients.

Les coûts de chauffage doivent déjà être indiqués sous la forme d'un tarif de chauffage en trois parties (voir chapitre 10.5**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) et comparés aux coûts d'autres types de chauffage.

## 3.3 Autres aspects

### 3.3.1 Financement

Le financement des investissements est souvent assuré par des frais de raccordement uniques, des fonds propres, des subventions et des prêts et crédits, l'idéal étant que les frais de raccordement uniques couvrent environ 25 % des coûts d'investissement. En cas de garantie publique, les conditions des prêts bancaires sont nettement plus avantageuses. Le financement par des fondations de prévoyance (par exemple, des caisses de pension), des formes d'investissement « vertes » ou durables (fonds, obligations, etc.) ou des modèles de participation citoyenne peut également être intéressant.

### 3.3.2 Société d'exploitation

En principe, les formes juridiques suivantes peuvent être envisagées pour la société d'exploitation :

- Entreprise privée
  - Entreprise individuelle
  - Sociétés de personnes (p. ex. société civile GbR)
  - Sociétés de capitaux (par exemple, société anonyme SA, société à responsabilité limitée Sàrl)
  - Coopératives
- Entreprise publique
  - Forme non soumise au droit privé (p. ex. entreprise municipale autonome
  - Forme de droit privé (p. ex. société à responsabilité limitée purement publique)

La forme juridique la plus appropriée dépend de différents facteurs (financement, structure de la clientèle, rôle des pouvoirs publics, etc.) et doit toujours être déterminée au cas par cas. Si la création d'une société d'exploitation propre n'est pas possible, le contracting constitue une alternative supplémentaire.

### 3.3.3 Facteurs de réussite et « obstacles »

Selon le rapport « Aspects socio-économiques des réseaux thermiques » [18], les principaux **facteurs de réussite** pendant la phase initiale du développement du projet sont les suivants:

- Développement professionnel du projet et étude de faisabilité
- Prise en compte des aspects socio-économiques
- Identification et classification des parties prenantes en fonction de leur motivation, de leur marge de manœuvre et de leurs mécanismes décisionnels
- Clarification précoce des responsabilités
- Communication de critères de référence clairs dès le début (par exemple, valeurs cibles pour la densité de raccordement, coûts de production de chaleur, progrès nécessaires en matière de raccordement, etc.
- Clients clés
- Visite d'exemples similaires existants par les autorités, les riverains et d'autres personnes intéressées
- Personne chargée de faire avancer le projet
- Extension progressive de la centrale et du réseau de chauffage à distance
- Soutien des pouvoirs publics
- Mise en avant des avantages pour la forêt (source de sympathie)
- Information précoce et transparente
- Mettre en avant les atouts du bois-énergie : renouvelable, neutre en $CO_2$ et respectueuse du climat, valeur ajoutée régionale, etc.

Selon le rapport « Risques liés aux réseaux thermiques » [20], les principaux **« obstacles »** lors de la phase initiale du développement du projet sont les suivants :

- Information insuffisante ou tardive
- Surestimation du potentiel de raccordement
- Oppositions et recours
- Contraintes de temps (rénovation des routes, clients clés, etc.)
- Réduction à un seul aspect (p. ex. particules fines)
- Crainte de dépendance
- Communication d'exemples négatifs
- Presse négative

# Partie 2 – Principes fondamentaux

# 4 Bois-énergie

## 4.1 Introduction

La qualité du combustible est un aspect important dans l'exploitation des installations de production d'énergie à partir du bois. Outre l'influence directe des coûts du combustible sur la rentabilité de l'exploitation, la qualité du bois utilisé a également un impact sur les coûts d'exploitation et de maintenance, ainsi que sur l'efficacité de l'installation et la production de polluants atmosphériques. C'est pourquoi les contrats de livraison entre les exploitants d'installations et les fournisseurs de combustible prévoient de plus en plus souvent des paramètres de qualité.

Outre les influences anthropiques (p.ex. la contamination par des matériaux minéraux tels que le gravier ou la terre provenant des sites de stockage), ce sont principalement les paramètres naturels qui déterminent la qualité du bois énergie. La composition naturelle du combustible a une incidence sur trois aspects essentiels de l'exploitation des installations de production d'énergie à partir du bois. Le pouvoir calorifique [MJ/kg] est déterminé de manière significative par les composants combustibles du bois, à savoir le carbone et l'hydrogène. Il diminue avec l'augmentation de la teneur en eau et en cendres. La teneur et la composition des cendres influencent les processus d'encrassement et de scorification ainsi que les processus de corrosion dans la technologie utilisée pour l'installation et ont donc un impact sur les coûts de maintenance.

En ce qui concerne les émissions libérées, les émissions d'oxyde d'azote et de poussière sont importantes en raison de la qualité du combustible. Les autres composants des gaz d'échappement (par exemple le $CO_2$ ou le CO) ne dépendent pas directement du combustible utilisé [21]. Le chapitre suivant a pour but de permettre aux exploitants d'installations d'évaluer la qualité des combustibles.

## 4.2 Composition élémentaire des combustibles à base de bois

Le bois utilisé comme combustible est principalement composé de carbone, d'hydrogène et d'oxygène (Tableau 4.1). Selon le type de combustible, il peut également contenir de l'azote et du soufre à des concentrations supérieures à 1 %. Le pouvoir calorifique est essentiellement déterminé par la teneur en carbone et en hydrogène. L'oxygène lié au combustible favorise le processus d'oxydation. Le soufre contribue au pouvoir calorifique d'un combustible et s'oxyde en $SO_2$ ou $SO_3$. Après la combustion, il peut réagir pour former d'autres composés. Les oxydes de soufre ($SO_x$) sont des composants indésirables des émissions, car ils polluent l'air. L'azote lié au combustible est le facteur essentiel dans la formation d'émissions indésirables d'oxydes d'azote ($NO_x$) lors de la combustion du bois.

Les éléments secondaires sont les principaux responsables de la formation de cendres. La teneur en cendres d'un combustible influence son pouvoir calorifique et, en combinaison avec la technologie de l'installation, a un impact sur les émissions de poussières. De plus, la teneur en cendres et la composition des cendres sont des facteurs importants en termes d'encrassement et de scorification de la technologie utilisée.

Une attention particulière doit être accordée aux éléments potassium, sodium, chlore et soufre. Le potassium et le sodium contribuent à abaisser le point de ramollissement des cendres. En raison de la formation de chlorures alcalins, ils jouent un rôle important dans les processus de corrosion (p. ex. sur les tubes des échangeurs de chaleur) liés à l'encrassement et à la formation de scories. Le chlore contenu dans le combustible peut former des composés indésirables tels que le chlorure d'hydrogène (HCl) ainsi que des dioxines et des furanes (PCDD/F). Les composés chlorés et soufrés ont un effet corrosif sur les équipements techniques.

Les oligo-éléments présents dans les combustibles ligneux se trouvent principalement sous forme de métaux lourds absorbés par les arbres pendant leur croissance. Ceux-ci peuvent être présents dans les combustibles à des concentrations très variables et avoir un effet toxique. Après la combustion, les métaux lourds (sous forme de vapeur dans les gaz d'échappement) se condensent ou s'adsorbent/absorbent sur les cendres, à quelques exceptions près. Ils sont ainsi liés aux cendres et peuvent être retirés du cycle naturel (par exemple par mise en décharge ou traitement). Dans les combustibles ligneux, les métaux lourds influencent la qualité des cendres, en particulier en ce qui concerne leur recyclabilité (voir chapitre 9).

## 4.3 Conditions de référence

Les combustibles solides biogènes sont composés de substances combustibles et non combustibles. Les composants non combustibles comprennent la teneur en eau et en cendres du combustible, tandis que la partie organique libère de l'énergie lors des processus d'oxydation. Alors que la teneur en substances organiques, minérales et en cendres se situe généralement dans une certaine fourchette en fonction des conditions locales et du type de bois, la teneur en eau peut varier considérablement. Afin de pouvoir comparer les analyses de combustibles, des états de référence sont définis (Figure 4.1).

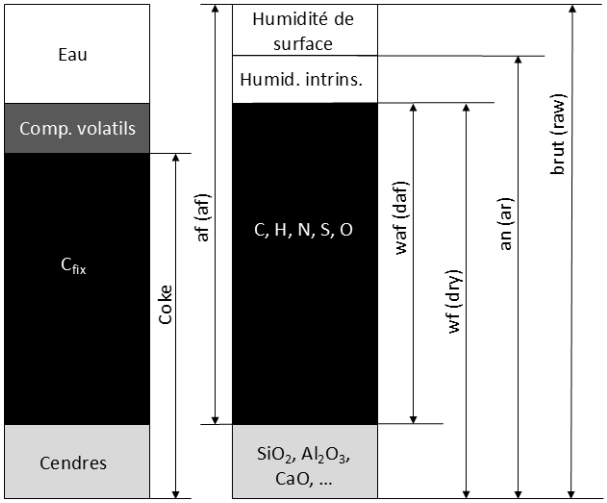



Figure 4.1 États de référence des combustibles solides.
brut (raw) : état brut
an (ar) : humidité d'analyse
wf (dry) : anhydre
af (af) : sans cendres
waf (daf) : exempt d'eau et de cendres

Tableau 4.1 Composition élémentaire du bois énergie.

| Catégorie | Éléments principaux | Éléments secondaires | Oligo-éléments |
|---|---|---|---|
| Éléments: | Carbone C<br>Oxygène O<br>Hydrogène H<br>Azote N | Phosphore P<br>Potassium K<br>Sodium Na<br>Soufre S<br>Calcium Ca<br>Silicium Si<br>Magnésium Mg<br>Chlore Cl | Bore B<br>Cuivre Cu<br>Fer Fe<br>Manganèse Mn<br>Zinc Zn<br>Plomb Pb<br>Chrome Cr<br>Arsenic As<br>Cadmium Cd<br>Autres éléments |
| Ordre de grandeur: | > 1 % ou<br>> 10'000 mg/kg | 0,01 - 1 % ou<br>100 – 10'000 mg/kg | < 0,01 % ou<br>< 100 mg/kg |
| Influence sur: | Teneur énergétique | Quantité/comportement des cendres, émissions, corrosion | Valorisation des cendres, émissions |

Par exemple, le pouvoir calorifique d'un échantillon de combustible à l'état anhydre est de $H_{u,wf}$ = 19 MJ/kg. À la livraison à la centrale thermique, le même échantillon à l'état brut, avec une teneur en eau de 50 % et une teneur en cendres de 0,5 %, aurait un pouvoir calorifique de $H_{u,brut}$ = 8,2 MJ/kg. Afin de préciser les résultats d'analyse des combustibles solides biogènes et de permettre leur comparaison, on distingue cinq états de référence [22] :

- État brut - brut (raw)
- Humidité d'analyse - an (as received, ar) : échantillon à l'état sec à l'air
- Sans eau - wf (dry, d) : l'indication se réfère au combustible sec
- Sans cendres - af (ash free, af) : l'indication se réfère au combustible sans cendres
- Sans eau et sans cendres - waf (dry, ash free, daf) : cette indication se réfère au combustible sans eau et sans cendres.

**Les résultats d'analyse** relatifs à différents états du combustible peuvent être **convertis** à l'aide des trois formules suivantes.

$$X_{wf} = \frac{x_i}{1-\gamma_{H_2O,1}}$$

$$X_{waf} = \frac{x_i}{1-\gamma_{A,1}-\gamma_{H_2O,1}}$$

$X_i$ Paramètre dans l'état de référence i

$\gamma_{Xi}$ Partie massique du paramètre du combustible X dans l'état de référence i [kg/kg]

**Le pouvoir calorifique** tient compte de l'enthalpie d'évaporation de l'eau contenue dans le combustible (2 441 MJ/kg $H_2O$).

$$H_{u,waf} = \frac{H_u + 2.441 * \gamma_{H_2O}}{1-\gamma_A-\gamma_{H_2O}} \left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

$$H_u = H_{u,waf} * \left(1-\gamma_A-\gamma_{H_2O}\right) - 2.441 * \gamma_{H_2O} \left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

# 4.4 Paramètres importants

## 4.4.1 Teneur en eau et humidité du bois

Les combustibles ligneux contiennent toujours une certaine quantité d'eau qui varie considérablement en fonction du type de bois, du moment de la récolte, du lieu et de la durée de stockage, et qui a une influence considérable sur la qualité de la combustion du bois. La teneur en eau se compose de l'humidité superficielle du bois (due notamment à des influences extérieures telles que les précipitations) et de l'humidité propre (eau stockée dans les parois cellulaires, les cavités cellulaires et les espaces intercellulaires).

La teneur en eau est indiquée soit comme teneur en eau, soit comme humidité du bois (ou humidité du bois). Ces indications diffèrent par leurs valeurs de référence différentes. Conformément à la norme DIN EN ISO 17225, elles sont exprimées en pourcentage massique (m-%) [23]. La **teneur en eau M** est le paramètre de qualité le plus important pour les combustibles à base de bois. Elle décrit l'eau $m_w$ contenue dans le combustible humide par rapport à sa masse totale, qui se compose de la masse du combustible anhydre $m_B$ et de l'eau $m_w$ qu'il contient.

$$\gamma_{H_2O} = \frac{m_w}{m_B + m_w}$$

$$M = \frac{m_w}{m_B + m_w} * 100$$

$\gamma_{H2O}$ Partie massique de l'eau dans le combustible [kg/kg]
M Teneur en eau [m.-%]
u Humidité du bois [m.-%]
$m_w$ Masse d'eau dans le combustible [kg]
$m_B$ Masse du combustible [kg]

En revanche, **l'humidité du bois u** décrit la quantité d'eau contenue dans le combustible $m_w$, par rapport à la quantité de combustible anhydre $m_B$. Pour u, des valeurs > 100 % sont donc possibles.

$$u = \frac{m_w}{m_B} * 100$$

Dans le domaine de l'utilisation énergétique, l'indication de la teneur en eau s'est largement imposée. L'indication de l'humidité du bois est plutôt inhabituelle en dehors de la sylviculture traditionnelle. L'humidité du bois peut être calculée à partir de la teneur en eau indiquée et inversement (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 Conversion de la teneur en eau M – humidité du bois u.

| Teneur en eau M [%] | Humidité du bois u [%] |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 20 | 25 |
| 25 | 33 |
| 40 | 67 |
| 50 | 100 |
| 60 | 150 |

## 4.4.2 Teneur en cendres

La teneur en cendres désigne la quantité de cendres qui reste après la combustion complète du combustible. Les cendres contenues dans un combustible sont constituées de sa partie inorganique, principalement les éléments secondaires énumérés au chapitre 4.2, tels que le silicium, le potassium ou le sodium. Les cendres contiennent également une grande partie des oligo-éléments ou métaux lourds présents dans le combustible, qui se déposent sur les cendres après la combustion. Si, par exemple, la concentration en fer d'un combustible est de 50 mg/kg (wf), la teneur en cendres du combustible de 0,5 % (wf) (soit 5 g de cendres par kg de combustible anhydre), la concentration en fer dans les cendres (en supposant que le fer est entièrement présent sous forme de $Fe_2O_3$ dans les cendres) passe à 10'000 mg/kg (chapitre **9**).9).

La teneur en cendres A se calcule à partir de la masse des cendres contenues dans le combustible $m_a$ par rapport à la masse du combustible utilisé $m_{B,i}$ (en indiquant l'état de référence i).

$$\gamma_{cendres} = \frac{m_A}{m_{B,i}} \gamma_{Asche} = \frac{m_A}{m_{B,i}}$$

$$A = \frac{m_A}{m_{B,i}} * 100$$

| | |
|---|---|
| $\gamma_{cendres}$ | Partie massique des cendres dans le combustible [kg/kg] |
| A | Teneur en cendres [m.-%] |
| $m_A$ | Masse des cendres dans le combustible [kg] |
| $m_{B,i}$ | Masse du combustible à l'état de référence [kg] |

## 4.4.3 Pouvoir calorifique et pouvoir calorifique supérieur

La chaleur libérée lors de la combustion (complète) de combustibles ligneux est indiquée sous forme de pouvoir calorifique supérieur ou inférieur. Le pouvoir calorifique supérieur $H_O$ (également appelé « pouvoir calorifique maximal ») décrit la quantité absolue d'énergie libérée lors de la combustion d'une quantité définie de combustible [MJ/kg]. Outre la chaleur sensible libérée, cette valeur comprend également l'énergie contenue dans les gaz de combustion sous forme de vapeur d'eau, qui peut être exploitée par condensation (« technologie de condensation »). Dans les installations de combustion du bois, l'eau s'échappe généralement sous forme de vapeur avec les gaz d'échappement. L'enthalpie d'évaporation de l'eau libérée lors de la condensation ne peut donc pas être exploitée. Le contenu énergétique du bois est donc généralement indiqué sous forme de pouvoir calorifique inférieur $H_u$ (également appelé « pouvoir calorifique inférieur »). Cette valeur indique le contenu énergétique d'un combustible [MJ/kg] moins la quantité d'énergie contenue dans les gaz d'échappement sous forme de vapeur d'eau. Elle dépend linéairement de la teneur en eau du combustible (Figure 4.2). Le Tableau 4.3 illustre l'influence de la teneur en eau sur le pouvoir calorifique.

Le pouvoir calorifique supérieur est déterminé en laboratoire par calorimétrie selon la norme EN ISO 18125:2017-08 [24]. Lors de la combustion du bois, de la vapeur d'eau se forme d'une part à partir de l'eau contenue dans le combustible et d'autre part à partir de la réaction de l'hydrogène lié au combustible avec l'oxygène. Pour calculer le pouvoir calorifique $H_U$ à partir du pouvoir calorifique supérieur $H_O$, on soustrait de $H_O$ la quantité d'énergie libérée lors de la condensation de cette vapeur d'eau.

$$H_u = H_O - h_V * \gamma_W \left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

$$\gamma_W = \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2}} * \gamma_{H_2} + \gamma_{H_2O} \left[\frac{kg}{kg}\right]$$

$$H_u = H_O - 2.441 * \left(8.937 * \gamma_{H_2} + \gamma_{H_2O}\right) \left[\frac{MJ}{kg}\right]$$

| | |
|---|---|
| $\gamma_W$ | Teneur spécifique en eau des gaz d'échappement en cas de combustion complète [kg/kg] |
| $h_V$ | Enthalpie d'évaporation de l'eau $h_V$ = 2'441 MJ/kg |
| $M_i$ | Masse molaire du paramètre de combustible i [kg/kmol] |
| $\gamma_i$ | Fraction massique du paramètre combustible i [kg/kg] |

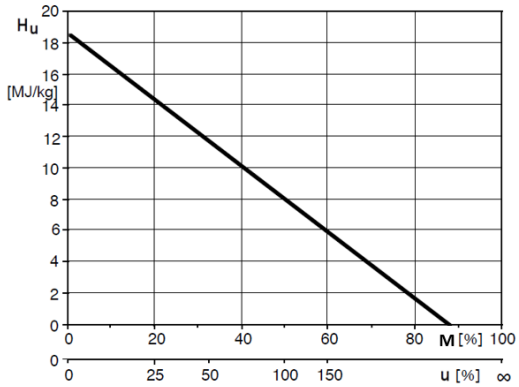



Figure 4.2 Pouvoir calorifique du bois en fonction de la teneur en eau M et de l'humidité du bois u.

Tableau 4.3 Pouvoir calorifique du bois en fonction de la teneur en eau M pour différentes essences et unités de mesure. Hypothèse pour le pouvoir calorifique en kWh/kg (base de référence anhydre) : 5.2 pour le bois tendre et 5.0 pour le bois dur [25].

| **Teneur en eau M en [m.-%]** | | **0** | **5** | **10** | **15** | **20** | **25** | **30** | **35** | **40** | **45** | **50** | **55** | **60** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Essence/densité[1)]** | **Unité de mesure** | **Pouvoir calorifique en fonction de la teneur en eau M** | | | | | | | | | | | | |
| | kWh/kg | 5.20 | 4.91 | 4.61 | 4.32 | 4.02 | 3.73 | 3.44 | 3.14 | 2.85 | 2.55 | 2.26 | 1.97 | 1.67 |
| Épicéa | kWh/m³p | 1‘971 | 1‘957 | 1‘942 | 1‘925 | 1‘906 | 1‘885 | 1‘860 | 1‘832 | 1‘799 | 1‘760 | 1‘713 | 1‘656 | 1‘584 |
| 379 $kg_{wf}$ /m³p | kWh/m³a | 1‘380 | 1‘370 | 1‘360 | 1‘348 | 1‘334 | 1‘319 | 1‘302 | 1‘282 | 1‘259 | 1‘232 | 1‘199 | 1‘159 | 1‘109 |
| | kWh/m³v | 788 | 783 | 777 | 770 | 763 | 754 | 744 | 733 | 720 | 704 | 685 | 662 | 634 |
| | kWh/kg | 5.20 | 4.91 | 4.61 | 4.32 | 4.02 | 3.73 | 3.44 | 3.14 | 2.85 | 2.55 | 2.26 | 1.97 | 1.67 |
| Pin | kWh/m³p | 2‘241 | 2‘226 | 2‘209 | 2‘189 | 2‘168 | 2‘144 | 2‘116 | 2‘083 | 2‘046 | 2‘001 | 1‘948 | 1‘883 | 1‘802 |
| 431 $kg_{wf}$ /m³p | kWh/m³a | 1‘569 | 1‘558 | 1‘546 | 1‘533 | 1‘518 | 1‘500 | 1‘481 | 1‘458 | 1‘432 | 1‘401 | 1‘364 | 1‘318 | 1‘261 |
| | kWh/m³v | 896 | 890 | 883 | 876 | 867 | 857 | 846 | 833 | 818 | 801 | 779 | 753 | 721 |
| | kWh/kg | 5.00 | 4.72 | 4.43 | 4.15 | 3.86 | 3.58 | 3.30 | 3.01 | 2.73 | 2.44 | 2.16 | 1.88 | 1.59 |
| Hêtre | kWh/m³p | 2‘790 | 2‘770 | 2‘748 | 2‘723 | 2‘695 | 2‘664 | 2‘627 | 2‘586 | 2‘537 | 2‘480 | 2‘411 | 2‘326 | 2‘221 |
| 558 $kg_{wf}$ /m³p | kWh/m³a | 1‘953 | 1‘939 | 1‘923 | 1‘906 | 1‘887 | 1‘864 | 1‘839 | 1‘810 | 1‘776 | 1‘736 | 1‘687 | 1‘628 | 1‘555 |
| | kWh/m³v | 1‘116 | 1‘108 | 1‘099 | 1‘089 | 1‘078 | 1‘065 | 1‘051 | 1‘034 | 1‘015 | 992 | 964 | 930 | 888 |
| | kWh/kg | 5.00 | 4.72 | 4.43 | 4.15 | 3.86 | 3.58 | 3.30 | 3.01 | 2.73 | 2.44 | 2.16 | 1.88 | 1.59 |
| Chêne | kWh/m³p | 2‘855 | 2‘835 | 2‘812 | 2‘786 | 2‘758 | 2‘726 | 2‘689 | 2‘646 | 2‘596 | 2‘537 | 2‘467 | 2‘380 | 2‘273 |
| 571 $kg_{wf}$ /m³p | kWh/m³a | 1‘999 | 1‘984 | 1‘968 | 1‘951 | 1‘931 | 1‘908 | 1‘882 | 1‘852 | 1‘817 | 1‘776 | 1‘727 | 1‘666 | 1‘591 |
| | kWh/m³v | 1‘142 | 1‘134 | 1‘125 | 1‘115 | 1‘103 | 1‘090 | 1‘075 | 1‘058 | 1‘038 | 1‘015 | 987 | 952 | 909 |
| | kWh/kg | | | 4.43 | 4.15 | 3.86 | 3.58 | 3.30 | 3.01 | 2.73 | 2.44 | 2.16 | 1.88 | 1.59 |
| Peuplier | kWh/m³p | | | 1‘738 | 1‘723 | 1‘705 | 1‘685 | 1‘662 | 1‘636 | 1‘605 | 1‘569 | 1‘525 | 1‘472 | 1‘405 |
| 353 $kg_{wf}$ /m³p | kWh/m³a | | | 1‘217 | 1‘206 | 1‘193 | 1‘179 | 1‘163 | 1‘145 | 1‘123 | 1‘098 | 1‘067 | 1‘030 | 983 |
| | kWh/m³v | | | 695 | 689 | 682 | 674 | 665 | 654 | 642 | 627 | 610 | 589 | 562 |

[1] Valeurs en kg de matière sèche (wf) par m3p (mètre cube plein ou mètre cube solide) sans retrait de séchage (masse volumique) [26]
Les pouvoirs calorifiques pour le mètre cube apparent (m³a ; anciennement en stères) ont été calculés de manière forfaitaire à 0,7 m³p /m³a et pour le mètre cube en vrac (m³v) de plaquettes de bois à 0,4 m³p /m³v (granulométrie P16S).

## 4.4.4 Masse volumique

Comme indiqué dans 4.4.3, le pouvoir calorifique est lié à la masse du combustible et dépend fortement de la teneur en eau. Cependant, il n'est souvent pas possible de peser les quantités de combustible livrées dans les petites installations, car l'infrastructure nécessaire fait défaut ou est trop coûteuse. C'est pourquoi il est courant, en particulier dans les petites installations, d'estimer les quantités de combustible sur la base du volume et de les facturer ainsi. Il existe différentes indications de volume/masse volumique issues de la sylviculture et de l'industrie du bois qui sont couramment utilisées dans le contexte du bois-énergie (voir Tableau 4.4).

Tableau 4.4 Masse volumique pour le bois-énergie [27] .

| **Volume** | **Définition** | **Unité** |
|---|---|---|
| Mètre cube plein (ou solide) | Volume de bois sur pied, 1 m³p correspond à 1 m³ de volume de bois solide, pour du bois empilé sans espaces intermédiaires | m³p, m³ |
| mètre cube apparent (anc. stère) | Bois empilé ; correspond à 1 m³ y compris les espaces vides (environ 0,8 m³) | m³a |
| Mètre cube en vrac | Quantité de bois en vrac ; utilisé pour les bûches, les plaquettes de bois, les copeaux, etc. (environ 0,4 m³) | m³v |
| Mètre cube en vrac | | |

**La densité apparente** d'un combustible [kg/m³a] est un paramètre important. Elle est principalement influencée par la densité physique du combustible [kg/m³], qui dépend fortement du type de bois et de sa teneur en eau. La densité apparente tient également compte de la taille des morceaux du combustible préparé. Dans le cas des plaquettes de bois et des résidus broyés, cela a une influence décisive sur les espaces vides dans un tas de combustible. La densité ou la densité apparente, combinée au pouvoir calorifique, détermine la densité énergétique volumique [MJ/m³] ou [kWh/m³] d'un combustible (voir Tableau 4.5). Il s'agit d'un paramètre important pour estimer les coûts de stockage et de transport. La masse de combustible m peut être calculée à partir de la densité du combustible ρ et du volume spatial V ($m = V * \rho$).

La densité apparente est toutefois considérée comme une valeur très imprécise, car elle dépend de nombreux facteurs. En principe, des dimensions irrégulières du combustible réduisent la densité apparente. L'homogénéité des plaquettes de bois est influencée à la fois par le procédé de traitement du combustible et par la matière première. Le traitement à l'aide de broyeurs ou de déchiqueteuses à vitesse lente donne des dimensions de combustible allongées et hétérogènes, avec de nombreux éclats et des points de rupture effilochés. La densité apparente d'un tel matériau est inférieure à celle obtenue avec des déchiqueteuses à tambour à vitesse rapide, dont le bois déchiqueté a tendance à présenter des bords plus lisses et, une proportion plus élevée de fines. Alors que les plaquettes de bois provenant de troncs ont des dimensions uniformes, les résidus d'éclaircissage ou d'entretien du

paysage contiennent des branches plus ou moins fines et grossières, ce qui conduit également à des dimensions très variables des plaquettes qui en sont issus. Il convient également de noter que le compactage du produit en vrac, par exemple en raison de la petite taille moyenne des particules (moins d'espaces vides) ou du tassement des particules pendant le transport, réduit le volume en vrac.

Pour convertir les mètres cubes pleins (bois non broyé) en mètres cubes en vrac (plaquettes ou copeaux de bois), on peut utiliser un facteur de décompactage moyen de 2.8. La norme EN ISO 17827 [28] décrit une méthode pour déterminer la densité apparente.

En résumé, on peut retenir que la détermination du volume livré est très simple et n'entraîne pratiquement aucun coût. Cependant, la référence au volume n'est pas bien adaptée pour indiquer le contenu énergétique ou le prix du combustible. En raison des variations de densité, de densité apparente et de teneur en eau du combustible, ces informations sont très imprécises. Une indication précise des paramètres pertinents n'est possible qu'à partir de la masse du combustible et en fonction de l'état de référence ou de la teneur en eau. Si un calcul basé sur le volume est approprié pour la conception du stockage de combustible et l'estimation des quantités transportées, il semble en revanche insuffisant pour la facturation des livraisons de combustible (section 4.7).

Tableau 4.5 Densité apparente et contenu énergétique de différents combustibles.

| Source d'énergie | Teneur en eau [m.-%] | Densité apparente [kg/m³v] | Contenu énergétique [kWh/m³v] | Volume par contenu énergétique [m³v/MWh] |
|---|---|---|---|---|
| Plaquettes de bois (BD)[1)] | 30 | 250 - 330 | 900 – 1'100 | 1,10 - 0,90 |
| Plaquettes de bois (BT)[1)] | 30 | 160 - 230 | 600 - 800 | 1,70 - 1,25 |
| Écorce (BD) | 50 | 500 | 1 000 | 1,00 |
| Écorce (BT) | 50 | 320 | 750 | 1,33 |
| Sciure (BD) | 40 | 230 - 270 | 650 - 750 | 1,50 - 1,33 |
| Sciure (BT) | 40 | 150 - 190 | 450 - 550 | 2,20 - 1,80 |
| Sciure | 15 | 170 | 717 | 1,39 |
| Plaquettes de bois | 15 | 90 | 380 | 2,63 |
| Briquettes | 2 | 900 – 1'500 | 4'500 – 7'500 | 0,17 |
| Granulés | 8 - 10 | 670 | 3'000 – 3'500 | 0,30 |
| Charbon | - | 870 | 8 300 | 0,12 |
| Fioul extra léger[2)] | - | 840 | 10 000 | 0,10 |

[1)] BD : bois dur, BT : bois tendre ; [2)] m³v correspond à m³

## 4.5 Approvisionnement en combustible pour les chaudières à bois à alimentation automatique

### 4.5.1 Aperçu

Le bois-énergie est un résidu ou un coproduit issu de l'exploitation du bois ou de l'entretien des forêts (par exemple, éclaircissage de peuplement de bois de tige). Les différentes sources, filières de traitement et de valorisation sont présentées dans la Figure 4.3. La norme DIN EN ISO 17225 [23] « Combustibles solides biogènes – Spécifications et classes de combustibles » a été progressivement élargie depuis 2014 et contient des classifications de différents combustibles à base de bois :

- Partie 1 : Exigences générales
- Partie 2 : Classification des granulés de bois
- Partie 3 : Classification des briquettes de bois
- Partie 4 : Classification des plaquettes de bois
- Partie 5 : Classification des bûches
- Partie 6 : Classification des granulés non ligneux
- Partie 7 : Classification des briquettes non ligneuses
- Partie 8 : Classification des combustibles issus de la biomasse traités thermiquement et compressés (retirée)
- Partie 9 : Classification des plaquettes de bois grossiers et des plaquettes de bois destinés à un usage industriel

Le flux de matière du bois-énergie peut être attribué à trois sources de matières premières: (1) l'exploitation forestière, (2) la culture du bois dans des plantations à croissance rapide (PCR) et (3) les résidus issus des mesures d'entretien du bois de paysage (BEP). Alors que les conifères en particulier sont utilisés comme matière première après la récolte, différentes catégories de bois-énergie sont produites dans la forêt et lors de la transformation du bois. Diverses étapes de transformation génèrent des produits intermédiaires qui sont utilisés comme combustible dans l'industrie de transformation du bois afin de couvrir ses propres besoins énergétiques. Outre cette utilisation interne, le bois-énergie issu de la production forestière est transformé en produits finis et livré aux clients finaux sous forme de bûches, de granulés, de plaquettes et de broyats. Le bois issu des plantations à croissance rapide est généralement broyé immédiatement après la récolte et livré sous forme de plaquettes aux (grands) consommateurs. Le bois issu de l'entretien du paysage suit un parcours similaire : après les mesures d'entretien, il est généralement rassemblé dans des points de collecte et transformé en plaquettes pour être valorisé énergétiquement. Une fois retiré du cycle d'utilisation matérielle, le bois usagé est valorisé énergétiquement dans des installations appropriées (voir Figure 4.3).

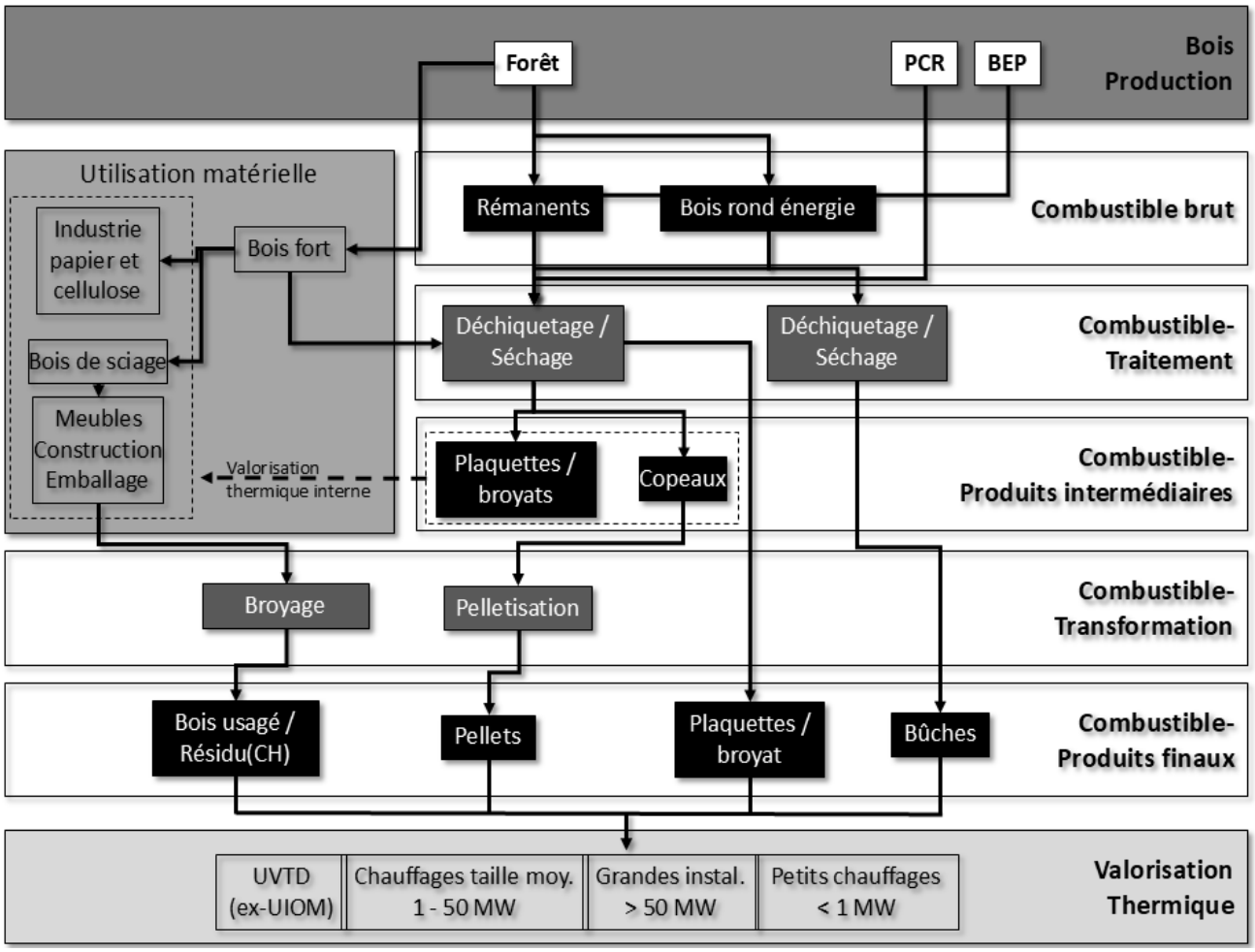



Figure 4.3 Diagramme du flux de matières du bois énergie.

### 4.5.2 Assortiments de bois énergie

**Résidus forestiers et bois rond énergie :** l'exploitation et l'entretien des forêts génèrent des résidus forestiers qui sont valorisés énergétiquement. Il s'agit d'une part de résidus d'éclaircissage et d'autre part de résidus issus de la récolte de grumes destinées à l'utilisation matérielle (principalement du bois mort en couronne). En raison de leur faible diamètre, ces deux assortiments présentent souvent une forte proportion d'écorce et, en particulier dans le cas de l'entretien des forêts de conifères, une proportion élevée d'aiguilles, ce qui impose des exigences accrues à la technique des installations. Lors de l'abattage ciblé de troncs faibles destinés à être utilisés comme bois rond énergétique, le bois mort est valorisé énergétiquement. La plupart du temps, les parties de l'arbre à forte teneur en cendres, telles que les aiguilles, les rameaux et les branches, restent sur place, ce qui permet d'obtenir un combustible de haute qualité.

**Combustible issu de plantations à croissance rapide (PCR) :** les plantations à croissance rapide sont généralement constituées d'essences à croissance rapide telles que le peuplier ou le saule, cultivées à des fins énergétiques. La récolte a lieu principalement en hiver, c'est-à-dire lorsque les arbres ont perdu leurs feuilles. La teneur en eau des plaquettes issus de PCR a tendance à être plus élevée que la teneur moyenne en eau des plaquettes fraîchement récoltés provenant de résidus forestiers et de bois rond énergétique. Les bois PCR ont également une densité brute relativement faible ; cet aspect, associé à la teneur élevée en eau, doit être pris en compte notamment dans le cas d'une facturation au volume. La teneur en cendres des plaquettes de bois issu de la culture de bois-énergie est généralement comparable à celle des résidus forestiers, en raison de la teneur plus élevée en écorce et en fines branches dans les deux assortiments par rapport au bois rond énergie. De même, le pouvoir calorifique (base de référence sans eau) est comparable à celui des résidus forestiers. La combustion de plaquettes de bois issus de la biomasse agricole fraîchement récoltés n'est pas recommandée, en particulier dans les petits foyers, car les fabricants prescrivent souvent l'utilisation de combustibles à faible teneur en eau (max. 30 à 35 %). La teneur en eau souhaitée peut être obtenue par séchage (naturel) ou en mélangeant les plaquettes de bois issus de la gestion durable des forêts avec des combustibles plus secs [29].

**Bois issu de l'entretien du paysage (BEP) :** le bois issu de l'entretien du paysage provient de l'entretien des haies et des talus le long des voies de communication (routes, voies ferrées et voies navigables), des lignes

électriques et des espaces verts en milieu urbain. Sa composition peut être très variable, par exemple, outre le bois tendre (p. ex. l'aulne, le peuplier et le saule), il peut également s'agir de bois dur (p. ex. érable, noisetier, charme). Au niveau communal, les déchets de jardin et de parc ainsi que les déchets d'élagage sont collectés séparément par des systèmes de ramassage ou d'apport volontaire. Ces déchets verts contiennent (en particulier en été) une forte proportion de matières herbacées qui se prêtent à une valorisation par compostage ou fermentation. Pour la valorisation thermique, la part riche en bois, qui est plus importante en hiver, est importante [30]. La littérature spécialisée fait souvent état de teneurs parfois élevées en polluants tels que les cendres, les métaux lourds ou le chlore dans le bois issu de l'entretien du paysage utilisé comme combustible, ce qui peut entraîner des exigences accrues en matière de procédures d'autorisation et de technologie des installations [31]. Des études scientifiques ont montré l'influence du salage des routes en hiver ou de la fertilisation des terres agricoles adjacentes. Toutefois, les teneurs en chlore mesurées dans le bois issu de l'entretien du paysage sont comparables à celles des plaquettes de bois forestier. Outre l'emplacement, le choix des parties de l'arbre qui seront transformées en plaquettes est donc déterminant. Des teneurs élevées en cendres et en chlore ont été constatées en particulier dans les branches plus fines, qui contiennent une proportion d'écorce plus importante que le bois [32].

**Bois usagé :** le bois utilisé comme matière première devient du bois usagé à la fin de sa durée de vie. Ce bois usagé provient de différentes sources et est valorisé dans le cadre d'une utilisation en cascade. Pour cela, il est collecté et traité dans des lieux appropriés. Les flux de matières y sont répartis en fonction de leur valorisation ultérieure : les bois usagés non contaminés, qui peuvent être utilisés comme matière première, sont réutilisés comme matière première secondaire. Les excédents ou les bois usagés contaminés, qui ne peuvent plus être utilisés comme matière première, sont destinés à la valorisation énergétique [33]. Les matériaux collectés sous le terme « bois usagé » se caractérisent notamment par leur hétérogénéité en termes de teneur en matières étrangères et en impuretés. Le classement du bois usagé selon la législation sur les déchets en fonction de son origine, de sa composition et de sa contamination par des substances dangereuses permet de le répartir en différentes catégories (Tableau 4.6).

Tableau 4.6 Classification des déchets de bois selon le catalogue européen des déchets [34] et les listes relatives au transport des déchets du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication [35].

| Désignation des déchets | Code déchet | Description |
|---|---|---|
| Déchets provenant du travail du bois et de la fabrication de panneaux, de meubles, de pâte à papier, de papier et de carton | 03 01 01 | Déchets d'écorce et de liège |
| | 03 01 04 | Sciure, plaquettes, chutes, bois, panneaux de particules et placages contenant des substances dangereuses/déchets de bois problématiques (CH) |
| | 03 01 05 | Sciure, plaquettes, chutes, bois, panneaux de particules et placages, à l'exception de ceux visés sous 030104*/Bois ayant subi un traitement mécanique uniquement (CH) |
| | 03 03 01 | Déchets d'écorce et de bois |
| Déchets d'emballage | 15 01 03 | Emballages en bois |
| | 15 01 10 | Emballages contenant des résidus de substances dangereuses ou contaminés par des substances dangereuses |
| Déchets de construction et de démolition, déblais | 17 02 01 | Bois, en Suisse, on utilise le code 17 02 97 ou 17 02 98 à la place de ce code |
| | 17 02 04 | Verre, plastique et bois contenant des substances dangereuses ou contaminés par des substances dangereuses/Verre ou plastique contenant des substances dangereuses ou contaminés par des substances dangereuses (CH) |
| | 17 02 97 | CH : bois usagé provenant de chantiers, de démolitions, de rénovations et de transformations |
| | 17 02 98* | CH : déchets de bois problématiques |
| Déchets provenant d'installations de traitement des déchets | 19 12 06 | Bois contenant des substances dangereuses/déchets de bois problématiques |
| | 19 12 07 | Bois autres que ceux visés à la rubrique 19 12 06/Déchets de bois non traité |
| Déchets municipaux | 20 01 37 | Bois contenant des substances dangereuses/déchets de bois problématiques |
| | 20 01 38 | Bois à l'exception de ceux relevant de la rubrique 200137/Déchets de bois non traité |
| | 20 03 07 | Déchets encombrants |
| * Déchets classés comme dangereux selon le catalogue européen des déchets [34] | | |

Tableau 4.7 Exemples de classification des déchets de bois en Allemagne et en Suisse.

<table>
<tr><th colspan="2">Allemagne</th><th colspan="3">Suisse</th></tr>
<tr><th>Catégorie</th><th>Description selon l'ordonnance sur les déchets de bois (AltholzV)</th><th>Description générale</th><th colspan="2">Ordonnance sur la protection de l'air (OPair)</th></tr>
<tr><td rowspan="2">A I</td><td rowspan="2">Bois usagé naturel ou uniquement traité mécaniquement</td><td>Bois forestier naturel<br><br>Résidus de bois provenant de scieries</td><td>Bois naturel (en morceaux et non en morceaux)<br>Lettres a+b<br>Bois usagé non traité<br>Lettre d 1</td><td rowspan="3">Combustibles à base de bois<br><br>Annexe 5, chiffre 31, alinéa 1</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Résidus de bois provenant de charpenteries, menuiseries</td><td>Bois usagé non traité<br>Lettre d 1</td></tr>
<tr><td rowspan="2">A II</td><td rowspan="2">Bois usagé collé, peint, revêtu, verni ou traité d'une autre manière, sans composés organiques halogénés dans le revêtement et sans produits de protection du bois.</td><td>Résidus de l’industrie du bois<br>Lettre c</td></tr>
<tr><td>Bois usagé traité sans produits de protection du bois, revêtement orga-nique halogéné ou PCB</td><td>Bois usagé<br>Lettre a</td><td rowspan="5">Les autres combustibles à base de bois ne sont pas considérés comme des combustibles bois.<br><br>Annexe 5, chiffre 31, alinéa 2</td></tr>
<tr><td>A III</td><td>Bois usagé dont le revêtement contient des composés organiques halogénés, sans produits de protection du bois.</td><td>Bois usagé traité avec un revêtement organique halogéné, sans produit de protection du bois</td><td rowspan="3">Déchets de bois problématiques<br>Lettre b</td></tr>
<tr><td>A IV</td><td>Bois usagé traité avec des produits de protection du bois […] ainsi que tout autre bois usagé qui […] ne peut être classé dans les catégories A I à A III, à l'exception du bois usagé contenant des PCB.</td><td rowspan="2">Bois usagé traité avec des produits de protection du bois<br>Déchets de bois traités aux PCB</td></tr>
<tr><td>Bois usagé contenant des PCB (polychlorobiphényles)</td><td>Bois usagé contenant des PCB au sens de l'ordonnance sur les déchets PCB/PCT et devant être éliminé conformément à ses dispositions, en particulier les panneaux d'isolation et d'insonorisation qui ont été traités avec des produits contenant des PCB</td></tr>
</table>

En Allemagne, outre le catalogage selon les codes déchets, il existe une classification en catégories de bois usagé (Tableau 4.7). En Suisse, le bois usagé n'est pas considéré comme un combustible, mais comme un déchet selon l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair) [36]. Les bois usagés AI et AII selon la classification allemande correspondent aux bois usagés autorisés par l'OPair, qui peuvent être brûlés dans des chaudières à bois (voir Tableau 4.7). Pour la valorisation thermique des assortiments contaminés (par exemple, les résidus de bois revêtus de PVC ou imprégnés sous pression), les réglementations spécifiques à chaque pays en matière de technologie des installations et de mesures de protection contre les émissions doivent être respectées. Le terme « résidus industriels ou de sciage » désigne un sous-produit de l'industrie de transformation du bois qui, en Suisse, n'est autorisé comme combustible que sous sa forme naturelle. En Autriche, les déchets de bois sont également classés comme déchets et non comme combustibles, mais les sous-produits de l'industrie de transformation du bois peuvent être utilisés comme combustibles. La valorisation thermique des déchets de bois s'effectue presque exclusivement dans des installations spéciales d'incinération des déchets de bois ou des ordures ménagères, ainsi que dans des installations industrielles destinées à la valorisation des

résidus biogènes (p. ex. industrie du papier et des panneaux). La co-incinération de déchets de bois non traités dans des installations de chauffage à distance et à distance alimentées par la biomasse est toutefois possible avec l'autorisation des autorités compétentes.

### 4.5.3 Préparation du combustible

**Broyage mécanique :** le broyage mécanique peut s'effectuer selon deux principes de base (voir Figure 4.4).

- Procédé de coupe à l'aide d'outils tranchants (broyeurs à tambour ou à disques) pour la production de plaquettes de bois ; les plaquettes présentent une bonne capacité à l'écoulement et forment un combustible homogène ; utilisé en particulier pour la production de plaquettes de bois forestier, dans les scieries et les entreprises de transformation du bois. Les plaquettes de bois selon la norme ISO 17225-4 doivent être produites à l'aide d'outils coupants.
- Procédé de broyage à l'aide d'outils émoussés (broyeurs à dents à rotation lente, broyeurs à marteaux, broyeurs à vis, etc.) pour la production de combustible déchiqueté. Le matériau déchiqueté s'agglutine facilement, présente une mauvaise capacité à l'écoulement et est particulièrement hétérogène. L'outil est moins sensible aux corps étrangers et est donc principalement utilisé dans le domaine de l'entretien des paysages.

**Séchage et stockage :** le stockage des combustibles est un maillon important de la chaîne d'approvisionnement. D'une part, les processus de séchage naturels qui se produisent pendant le stockage permettent d'améliorer la qualité grâce à la diminution de la teneur en eau. D'autre part, le stockage joue un rôle important en tant que réserve permettant de répondre à la demande en combustible. Il existe en principe différentes possibilités : stockage avant ou après le broyage, séchage naturel ou technique, stockage à l'air libre ou dans des hangars. Les possibilités d'utilisation ainsi que les avantages et les inconvénients des différentes méthodes sont décrits ci-après [37].



Figure 4.4 Distinction entre les plaquettes de bois (coupés avec des outils tranchants, à gauche) et le bois broyé (avec des outils émoussés, à droite).

Après la récolte, le bois à broyer peut-être stocké sous forme de piles pendant plusieurs semaines, voire plusieurs mois, dans un lieu de stockage approprié. Cela permet d'obtenir un préséchage avec une teneur en eau comprise entre < 50 % et < 30 %. Un lieu de stockage idéal pour le préséchage doit être bien aéré et ensoleillé, situé à proximité d'une forêt, disposer d'un sol sec et perméable et être accessible toute l'année.

Le séchage naturel des tas de plaquettes de bois s'effectue par convection. L'auto-échauffement dans le tas crée une différence de température par rapport à l'environnement. L'air chaud s'élève alors du tas et évacue l'humidité, tandis que de l'air plus frais et plus sec afflue latéralement. La taille et la forme du tas de plaquettes de bois jouent un rôle important. La forme doit être similaire à celle d'un toit (« cône pointu »). Cela favorise la convection (effet de cheminée) et empêche l'eau de pluie de s'accumuler dans les creux à la surface du tas. De plus, une couverture en non-tissé perméable à la vapeur protège des précipitations tout en permettant l'évaporation de l'intérieur. La hauteur du silo ne doit pas dépasser quatre mètres afin d'éviter le risque d'incendie par auto-inflammation. Le séchage technique est quant à lui nettement plus rapide, mais aussi plus coûteux. Pour le séchage, il est possible d'utiliser la chaleur résiduelle des centrales électriques, telles que les centrales de cogénération au biogaz, ou le séchage solaire avec des capteurs à air [38].

Les plaquettes de bois sont souvent fabriquées à partir de bois fraîchement récolté avec une teneur en eau élevée > 50 % et stockés pendant une longue période dans un entrepôt couvert ou non couvert ou dans la chaufferie avant d'être utilisés. Le stockage de plaquettes de bois frais à forte teneur en eau peut poser divers problèmes :

- Des processus biologiques réchauffent le tas de plaquettes, ce qui peut entraîner un incendie.
- L'eau se condense à la surface du tas, ce qui entraîne la formation de moisissures nocives pour la santé.
- Les processus de dégradation et les champignons xylophages réduisent la matière organique (diminution de la densité et augmentation de la teneur en cendres) ; cela peut entraîner une détérioration des paramètres du combustible (p. ex. enrichissement en azote).

Ces risques peuvent être réduits par un séchage rapide du matériau jusqu'à une teneur en eau inférieure à 30 % et par des conditions de stockage appropriées. L'idéal est d'utiliser des plaquettes grossières et à arêtes vives avec une faible proportion de fines. Cela offre suffisamment d'espaces pour la circulation de l'air et l'évacuation de l'humidité. La durée de stockage ne doit pas être trop longue, trois mois constituent une valeur indicative. Lors du stockage et de l'utilisation, il convient de respecter un ordre approprié (principe « premier entré, premier sorti »).

Pour le stockage à l'air libre, veillez à choisir un sol sec et un emplacement aussi ensoleillé et exposé au vent que possible. Contrairement à un sol non stabilisé, un sol stabilisé peut être emprunté toute l'année par des véhicules lourds. Les emplacements recouverts de gravier, qui stabilisent les surfaces sans les imperméabiliser, ont fait leurs preuves. Cependant, contrairement aux surfaces goudronnées, il est possible que le combustible soit contaminé par des résidus de terre minérale, d'humus et de pierres sur ces emplacements et sur les emplacements non stabilisés. Lorsqu'il est stocké dans des bâtiments tels que des silos à plaquettes de bois ou des hangars, le combustible est protégé des précipitations. Une bonne circulation de l'air doit être assurée afin d'éviter la condensation et la formation de moisissures qui en résulte.

**Pressage/granulation :** les granulés (pellets) de bois sont obtenus par compression de résidus de sciage ou de rabotage secs et naturels, avec ou sans ajout d'additifs. La norme DIN EN ISO 17225-2 définit les exigences relatives aux matières premières et aux propriétés des granulés (diamètre et longueur, teneur en eau, teneur en cendres et fusibilité des cendres, résistance mécanique,

teneur en fines, additifs, pouvoir calorifique, densité apparente, teneur en éléments), classées selon leur utilisation dans le secteur commercial et domestique (A1, A2, B) et dans le secteur industriel (I1, I2, I3).

Bien que les pellets soient un combustible très sec, des processus se produisent pendant le stockage qui entraînent ce que l'on appelle le dégazage et l'auto-échauffement du combustible. Les substances extraites contenues dans le bois (résines, graisses et acides gras libres) remontent à la surface du combustible sous l'effet des températures élevées lors du séchage ou de la pression lors de la granulation et entrent ainsi en contact avec l'oxygène de l'air. Cela déclenche des réactions d'oxydation qui entraînent la libération d'hydrocarbures organiques volatils (COV), de monoxyde de carbone (CO) et de dioxyde de carbone ($CO_2$). Les composés organiques qui en résultent, tels que l'acide butyrique et les aldéhydes, peuvent provoquer des nuisances olfactives. Les gaz inodores CO et $CO_2$ peuvent entraîner un manque d'oxygène dans les locaux de stockage insuffisamment ventilés, ce qui présente un risque d'asphyxie et d'intoxication pour le personnel. En combinaison avec l'auto-échauffement du combustible (due à la fois à des réactions d'oxydation exothermiques et à la chaleur d'adsorption générée lorsque les granulés absorbent l'humidité de l'air), la présence de gaz inflammables tels que le CO peut entraîner une auto-inflammation, en particulier dans les très grands entrepôts. Les entrepôts de granulés doivent donc toujours être suffisamment ventilés (voir les chapitres 14.2.9 et19). Le dégagement gazeux diminue avec l'âge du combustible et la durée de stockage. D'autres facteurs influents sont la contrainte mécanique pendant le remplissage du silo (trajets aussi courts que possible pour éviter la formation de poussière par frottement) et la température de stockage (plus elle est basse, plus l'activité est faible) [39].

### 4.5.4 Paramètres de qualité

Les combustibles à base de bois présentent de grandes différences de qualité en raison des différentes matières premières utilisées et des différences dans le processus de fabrication. Un fonctionnement à faibles émissions, sans perturbations et économe en énergie des chauffages au bois n'est possible qu'avec l'utilisation d'un combustible adapté à l'installation (chapitres 5 et 13). Les petites installations de chauffage (appareils standards de série), par exemple, nécessitent des qualités homogènes constantes avec une faible teneur en eau, en cendres et en fines. Une évaluation précise de la qualité du combustible est également essentielle pour la facturation. Le Tableau 4.8 donne un aperçu des principaux paramètres de qualité permettant d'évaluer les combustibles « au premier coup d'œil ».

Tableau 4.8 Caractéristiques typiques pour l'évaluation de la qualité du combustible.

| Paramètres de qualité | « Bonne » qualité | « Mauvaise » qualité |
|---|---|---|
| Teneur en eau | faible | élevée |
| Teneur en cendres | faible | élevée |
| Pouvoir calorifique | élevé | faible |
| Forme des particules | à arêtes vives | rugueuse |
| Teneur en fines | faible | élevée |
| Surlongueurs | faible | élevée |
| Teneur en matières indésirables | faible | élevée |

Le Tableau 4.9 contient les plages de valeurs typiques des paramètres importants du combustible pour le bois et l'écorce des feuillus et des conifères ainsi que pour le bois usagé. Les essences de saule et de peuplier sont représentatives du bois issu de la culture à courte rotation ou de l'entretien du paysage (PCRKUP et BEPLPH). Il convient de noter que les valeurs indiquées couvrent de larges plages de variation. La valeur typique est une référence déterminée statistiquement. La composition réelle du combustible peut s'en écarter et dépend, par exemple, de l'emplacement. Les planificateurs, les fournisseurs et les exploitants d'installations doivent donc définir des valeurs individuelles pour la conception. Des bases de données en ligne telles que Phyllis2 [40] ou FRED de l'Office bavarois de l'environnement [41] contiennent des données supplémentaires sur différents combustibles.

Tableau 4.9 Paramètres typiques du bois et de l'écorce – Partie I Éléments principaux [23], [33], [42].

| Paramètres | Unité (État de référence : wf) | | Bois (sans écorce, feuilles, aiguilles) | | Écorce | | PCR et BEP | | Bois mort |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Bois résineux | Bois feuillu | Bois résineux | Bois feuillu | Saule | Peuplier | |
| Teneur en cendres | m-% | Plage valeurs | 0,1 - 1,0 | 0,2 - 1,0 | < 1 - 5 | 0,8 - 3,0 | 1,1 - 4,0 | 1,5 - 3,4 | 0 - 2 |
| | | Valeur typique | 0,3 | 0,3 | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 2,0 | |
| Pouvoir calorifique | MJ/kg | Plage valeurs | 18,5 - 19,8 | 18,4 - 19,2 | 17,5 - 20,5 | 17,1 - 21,3 | 17,7 - 19,0 | 18,1 - 18,8 | 18 - 20,2 |
| | | Valeur typique | 19,1 | 18,9 | 19,2 | 19 | 18,4 | 18,4 | |
| Carbone C | % en masse | Plage valeurs | 47 - 54 | 48 - 52 | 48 - 55 | 47 - 55 | 46 - 49 | 46 - 50 | n.d. |
| | | Valeur typique | 51 | 49 | 52 | 52 | 48 | 48 | |
| Hydrogène H | % en masse | Plage valeurs | 5,6 - 7,0 | 5,9 - 6,5 | 5,5 - 6,4 | 5,3 - 6,4 | 5,7 - 6,4 | 5,7 - 6,5 | n.d. |
| | | Valeur typique | 6,3 | 6,2 | 5,9 | 5,8 | 6,1 | 6,2 | |
| Oxygène O | % en masse | Plage valeurs | 40 - 44 | 41 - 45 | 34 - 42 | 32 - 42 | 40 - 44 | 39 - 45 | n.d. |
| | | Valeur typique | 42 | 44 | 38 | 38 | 43 | 43 | |
| Azote N | % | Plage valeurs | < 0,1 - 0,5 | < 0,1 - 0,5 | 0,3 - 0,9 | 0,1 - 0,8 | 0,2 - 0,8 | 0,2 - 0,6 | n.d. |
| | | Valeur typique | 0,1[1)] | 0,2[1)] | 0,5 | 0,3 | 0,5 | 0,4 | |
| Soufre S | % en masse | Plage valeurs | < 0,01 - 0,02 | < 0,01 - 0,05 | < 0,02 - 0,05 | < 0,02 - 0,20 | 0,02 - 0,10 | 0,02 - 0,10 | n.d. |
| | | Valeur typique | < 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 005 | 0,03 | |
| Chlore Cl | % en masse | Plage valeurs | < 0,01 - 0,03 | < 0,01 - 0,03 | < 0,01 - 0,05 | < 0,01 - 0,05 | 0,01 - 0,05 | < 0,01 - 0,05 | 0,02 - 0,20 |
| | | Valeur typique | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | < 0,01 | |
| Fluor F | % en masse | Plage valeurs | < 0,0005 | < 0,0005 | < 0,0005 - 0,002 | n.d. | 0 - 0,01 | n.d. | n.d. |
| | | Valeur typique | < 0,0005 | < 0,0005 | 0,001 | | 0,003 | | |
| Aluminium Al | mg/kg | Plage valeurs | 30 - 400 | < 10 - 50 | 400 - 1 200 | 30 -100 | 3 - 100 | n.d. | n.d. |
| | | Valeur typique | 100 | 20 | 800 | 50 | 50 | 10 | |
| Calcium Ca | mg/kg | Plage valeurs | 500 - 1 000 | 800 - 20 000 | 1 000 - 15 000 | 10 000 - 20 000 | 2 000 - 9 000 | 4 000 - 6 000 | n.d. |
| | | Valeur typique | 900 | 1 200 | 5 000 | 15 000 | 5 000 | 5 000 | |
| Fer Fe | mg/kg | Plage valeurs | 10 - 100 | 10 - 100 | 100 - 800 | 50 - 200 | 30 - 600 | n.d. | n.d. |
| | | Valeur typique | 25 | 25 | 500 | 100 | 100 | 30 | |
| Potassium K | mg/kg | Plage valeurs | 200 - 500 | 500 - 1 500 | 1 000 - 3 000 | 1 000 - 3 200 | 1 700 - 4 000 | 2 000 - 4 000 | n.d. |
| | | Valeur typique | 400 | 800 | 2 000 | 2 000 | 2 500 | 2 500 | |
| Magnésium Mg | mg/kg | Plage valeurs | 100 - 200 | 100 - 400 | 400 - 1 500 | 400 - 1 000 | 200 - 800 | 200 - 800 | n.d. |
| | | Valeur typique | 150 | 200 | 1 000 | 500 | 500 | 500 | |
| Manganèse Mn | mg/kg | Plage valeurs | 40 - 200 | n.d. | 9 - 840 | n.d. | 79 - 160 | n.d. | n.d. |
| | | Valeur typique | 100 | | 500 | 190 | 97 | 20 | |
| Sodium Na | mg/kg | Plage valeurs | 10 - 50 | 10 - 200 | 70 - 2 000 | 20 - 1 000 | 10 - 450 | 10 - 60 | n.d. |
| | | Valeur typique | 20 | 50 | 300 | 100 | n.d. | 25 | |
| Phosphore P | mg/kg | Plage valeurs | 50 - 100 | 50 - 200 | 20 - 600 | 300 - 700 | 500 - 1 300 | 800 - 1 100 | n.d. |
| | | Valeur typique | 60 | 100 | 400 | 400 | 800 | 1 000 | |
| Silicium Si | mg/kg | Plage valeurs | 100 - 200 | 100 - 200 | 500 - 5 000 | 2 000 - 20 000 | 2 - 2 000 | n.d. | n.d. |
| | | Valeur typique | 150 | 150 | 2 000 | 2 500 | 500 | | |
| Arsenic As | mg/kg | Plage valeurs | < 0,1 - 1,0 | < 0,1 - 1,0 | 0,1 - 4,0 | 0,1 - 4 | < 0,1 | < 0,1 - 0,2 | 0,39 - 15,4 |
| | | Valeur typique | < 0,1 | < 0,1 | 1,0 | 0,4 | < 0,1 | < 0,1 | |
| Cadmium Cd | mg/kg | Plage valeurs | < 0,05 - 0,50 | < 0,05 - 0,50 | 0,2 - 1,0 | 0,2 - 1,2 | 0,2 - 5 | 0,2 - 1 | n.d. |
| | | Valeur typique | 0,1 | 0,10 | 0,5 | 0,5 | 2 | 0,5 | |
| Chrome Cr | mg/kg | Plage valeurs | 0,2 - 10,0 | 0,2 - 10,0 | 1 - 10 | 1 - 30 | 0,3 - 5 | 0,3 - 2 | 0,1 - 5,3 |
| | | Valeur typique | 1,0 | 1,0 | 5 | 5 | 1 | 1 | |
| Cuivre Cu | mg/kg | Plage valeurs | 0,5 - 10,0 | 0,5 - 10,0 | 3 - 30 | 2 - 20 | 2 - 4 | 2 - 4 | 3,4 - 668,4 |
| | | Valeur typique | 2,0 | 2,0 | 5 | 5 | 3 | 3 | |
| Mercure Hg | mg/kg | Plage valeurs | < 0,02 - 0,05 | < 0,02 - 0,05 | 0,01 - 0,1 | n.d. | < 0,03 | < 0,03 | 0,02 - 36,1 |
| | | Valeur typique | 0,02 | 0,02 | 0,05 | < 0,05 | < 0,03 | < 0,03 | |
| Nickel Ni | mg/kg | Plage valeurs | < 0,1 - 10,0 | < 0,1 - 10,0 | 2 - 20 | 2 - 10 | 0,2 - 2 | 0,2 - 1,0 | n.d. |
| | | Valeur typique | 0,5 | 0,5 | 10 | 10 | 0,5 | 0,5 | |
| Plomb Pb | mg/kg | Plage valeurs | < 0,5 - 10,0 | < 0,5 - 10,0 | 1 - 30 | 2 - 30 | 0,1 - 0,2 | 0,1 - 0,3 | 9,3 - 3 314,3 |
| | | Valeur typique | 2,0 | 2,0 | 4 | 15 | 0,1 | 0,1 | |
| Vanadium V | mg/kg | Plage valeurs | < 2 | < 2 | 0,7 - 2,0 | 1 - 4 | 0,2 - 0,6 | n.d. | n.d. |
| | | Valeur typique | < 2 | < 2 | 1,0 | 2 | 0,3 | | |
| Zinc Zn | mg/kg | Plage valeurs | 5 - 50 | 5 - 100 | 70 - 200 | 7 - 200 | 40 - 100 | 30 - 100 | n.d. |
| | | Valeur typique | 10 | 10 | 100 | 50 | 70 | 50 | |

[1]La teneur en azote typique varie selon le type de bois : épicéa 0,1, sapin blanc 0,17, hêtre 0,22 [43] . n.d. = non disponible.

**La teneur en eau** est le paramètre le plus important en termes de qualité du combustible. La teneur en eau est un facteur essentiel pour la capacité de stockage et la stabilité du combustible prêt à l'emploi, ainsi que pour la nécessité d'un séchage (teneur en eau cible < 30 à 35 %) ou, le cas échéant, d'un mélange. Elle influence directement le pouvoir calorifique, car l'eau contenue dans le combustible doit d'abord être évaporée lors de la combustion à l'aide d'énergie thermique. Sans technologie de condensation, cette énergie thermique ne peut pas être récupérée par condensation de la vapeur. De plus, la teneur en eau a une influence sur les émissions de CO et de poussières libérées lors de la combustion, ainsi que sur la production de cendres. La masse de l'eau elle-même et les effets de retrait lors du séchage influencent la densité apparente du combustible.

La teneur en eau typique des grumes fraîchement récoltées (bois de cœur et aubier) ainsi que des plaquettes de bois frais est comprise entre 45 et 55 %, et souvent supérieure à 55 % pour les matériaux issus de la biomasse agricole. Le séchage technique ou naturel permet d'obtenir des teneurs en eau nettement inférieures, comprises entre 15 et 35 %. Les plaquettes de bois dont la teneur en eau est inférieure à 15 % ne peuvent généralement être produits que par séchage technique. Les granulés de bois, qui ont une teneur en eau inférieure à 10 % selon la norme, sont en revanche un combustible particulièrement sec. Selon la technique de combustion utilisée, certaines teneurs en eau ne doivent pas être dépassées dans le combustible (chapitre 5). Pour les chaudières de petite à moyenne puissance, les fabricants et la législation imposent des exigences relativement élevées au combustible, et les plages de teneur en eau définies lors des essais de type doivent être respectées (par exemple, pour les petits appareils/poêles à granulés < 15 à 20 %, pour les appareils de série < 35 %). Dans les grandes centrales de chauffage (thermiques), un fonctionnement fiable est également possible avec des teneurs en eau > 35 %, voire avec du bois fraîchement coupé ([37], [44]).

**La teneur en cendres** d'un combustible a une influence sur les émissions de particules et la formation de scories lors de la combustion, ainsi que sur les coûts d'élimination de la quantité totale de cendres produites pendant le fonctionnement de l'installation. Une teneur élevée en cendres favorise l'usure et la corrosion des composants de l'installation. En fonction de leur composition chimique, les cendres sont recyclées, par exemple comme composant d'engrais ou comme additif dans la fabrication du ciment. Si le recyclage n'est pas possible (par exemple en raison d'une teneur trop élevée en métaux lourds), les cendres doivent être éliminées dans des décharges appropriées [44].

Comme le montre le tableau 4.9, la teneur en cendres varie entre 0,1 et 5 % selon le type de bois et la proportion d'écorce. La norme DIN EN ISO 17225-4 définit quatre classes pour les plaquettes de bois (A1 à B2) avec des teneurs en cendres admissibles comprises entre < 1 % et < 3 %. Les teneurs en cendres plus élevées sont généralement dues à des proportions plus importantes d'écorce et d'aiguilles. Plus le diamètre d'un arbre est faible ou plus la proportion de branches est élevée, plus le rapport entre l'écorce et le bois est important. La contamination par des matériaux inorganiques (par exemple, de la terre ou des pierres) est également un facteur influent.

**Les pouvoirs calorifiques** typiques de l'écorce ou du bois (base de référence anhydre) se situent entre 17,1 et 21,3 MJ/kg (Tableau 4.9), l'écorce couvrant une plage de variation nettement plus importante. En raison de leur teneur en carbone légèrement plus élevée, le pouvoir calorifique des résineux a tendance à être supérieur à celui des feuillus. Cet aspect est toutefois d'une importance secondaire par rapport aux autres paramètres. En raison des concentrations plus élevées en éléments secondaires et oligo-éléments formant des cendres, la teneur en cendres de l'écorce est généralement nettement plus élevée que celle du bois correspondant. Il en résulte que le pouvoir calorifique de l'écorce peut être supérieur ou inférieur à celui du bois correspondant [21]. Des teneurs en cendres très élevées, dues par exemple à des impuretés minérales ou à la dégradation de la lignine par des champignons spécifiques, réduisent le pouvoir calorifique [44].

La **taille des particules** influence considérablement les propriétés d'écoulement ainsi que le comportement du combustible lors du stockage et du séchage. La taille des particules est fortement influencée par les étapes de production et de traitement, mais dépend également du type de bois et de l'assortiment choisi. Les petites particules ou une forte proportion de fines peuvent limiter l'aération et entraîner des émissions de poussière lors du remplissage de la trémie. De plus, une forte proportion de fines a un impact négatif sur la qualité de la combustion. L'alimentation régulière en air dans le lit de combustion est entravée, ce qui entraîne la formation de points chauds. Cela conduit à une usure accrue dans la zone de la grille et du revêtement réfractaire, ainsi qu'à une teneur en poussières fines plus élevée due aux traces de substances dans les gaz d'échappement qui ne sont plus liées aux cendres. Les particules de grande taille, trop longues ou effilochées (= sans arêtes vives) favorisent les blocages dans les systèmes de transport tels que les vis sans fin et peuvent provoquer la formation de ponts dans le silo. Les plaquettes de bois de haute qualité présentent une fraction principale relativement homogène, une faible proportion de fines, une longueur maximale réduite et des arêtes vives [37].

La proportion d'impuretés correspond au pourcentage de matières étrangères présentes dans le combustible. Outre les pièces métalliques, les pierres et les déchets (impuretés grossières), cette catégorie comprend notamment l'humus adhérent et la terre minérale (impuretés fines). Si des impuretés grossières sont broyées involontairement, le broyeur lui-même, les composants du système de transport ou du système de chauffage peuvent être considérablement endommagés par ces matières étrangères. La terre adhérente entraîne une usure accrue des couteaux du broyeur et augmente la teneur en cendres. Lors de la combustion dans une centrale thermique (ou une centrale de cogénération), une teneur en cendres accrue due aux matières étrangères, un comportement de fusion des cendres modifié et, le cas échéant, une teneur accrue en métaux lourds du combustible ou des cendres entraînent des coûts d'élimination plus élevés, de la corrosion et un encrassement des composants de l'installation [44].

Afin de pouvoir tenir compte au mieux de la composition variable des combustibles et des propriétés de combustion qui en résultent lors du choix des techniques de combustion et d'évacuation des gaz, QM Chauffages au bois a élaboré une classification des combustibles (voir Tableau 4.10 et Tableau 4.11).

Tableau 4.10 Partie I - Classification des combustibles et des tailles de particules par QM Chauffages au bois sur la base des spécifications de la norme EN ISO 17225-1, la classification des tailles de particules a été complétée par les classes S de la norme EN ISO 17225-4.

| Combustibles | Abréviation | **Taille des particules** mm (voir Tableau 4.11 ) **P** | **Teneur en eau** % en masse à l'état de livraison **M** | **Teneur en azote** % en masse sur base anhydre base de référence **N**[11] | **Particules fines < 3,15 mm** % en masse à l'état de livraison **F** | **Teneur en cendres avec impuretés** % en masse sur base anhydre Base de référence **A** | **Contenu énergétique** Par rapport à $H_{u\,humide}$ Plage de variation kWh/m³v |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Plaquettes de qualité issues de l'exploitation forestière (bois rond) (PFS)[1) 9)] et de résidus industriels (RI)[1) 9)] | fine<br>PFS-P16S-M20<br>RI-P16S-M20 | 16S | 15 - 20 | 0,1 - 0,5<br>(0,2) | F05 | A1,0 | BT : 700 - 900<br>BD : 1 000 - 1 200 |
| | grosse<br>PFS-P31S-M20<br>RI-P31S-M20 | 31S | 15 - 20 | 0,1 - 0,5<br>(0,2) | F05 | A1,0 | BT : 630 - 850<br>BD : 950 - 1 150 |
| Plaquettes de bois issus de résidus forestiers (PFS)[1)] et résidus de bois industriels (RI)[1) 2)] | PFS-P31S-M35<br>RI-P31S-M35 | 31S | 20 - 35 | 0,1 - 0,5<br>(0,2) | F10 | A3.0 | BT : 600 - 800<br>BD : 900 - 1 100 |
| | PFS-P31S-M50<br>RI-P31S-M50 | 31S | 30 - 50 | 0,1 - 0,5<br>(0,2) | F10 | A3.0 | BT : 550 - 750<br>BD : 850 - 1 050 |
| | PFS-P31S-M55+<br>RI-P31S-M55+ | 31S | 30 - 60 | 0,1 - 0,5<br>(0,2) | F10 | A3.0 | BT : 500 - 700<br>BD : 800 - 1 000 |
| | PFS-P45S-M35<br>RI-P45S-M35 | 45S | 20 - 35 | 0,1 - 0,5<br>(0,2) | F10 | A3.0 | BT : 550 - 750<br>BD : 850 - 1 050 |
| | PFS-P45S-M50<br>RI-P45S-M50 | 45S | 30 - 50 | 0,1 - 0,5<br>(0,2) | F10 | A3.0 | BT : 500 - 700<br>BD : 800 - 1 000 |
| | PFS-P45S-M55+<br>RI-P45S-M55+ | 45S | 30 - 60 | 0,1 - 0,5<br>(0,2) | F10 | A3.0 | BT : 450 - 650<br>BD : 750 - 950 |
| | PFS-P63-M50<br>RI-P63-M50 | 63 | 30 - 50 | 0,1 - 0,5<br>(0,2) | F10 | A3.0 | BT : 450 - 650<br>BD : 750 - 950 |
| | PFS-P63-M55+<br>RI-P63-M55+ | 63 | 30 - 60 | 0,1 - 0,5<br>(0,2) | F10 | A3.0 | BT : 400 - 600<br>BD : 700 - 900 |
| Peupliers et saules provenant de forêts et de campagnes | PSF | 31S<br>45S<br>63 | 30 - 60 | 0,2 - 0,8<br>(0,3) | F10<br>F10<br>F10 | A5.0 | 450 - 700<br>400 - 650<br>350 - 600 |
| Peuplier et saule provenant de surfaces à rotation courte | PSTCR | 31<br>45<br>63 | 30 - 60 | 0,5 - 3,0<br>(0,5) | F25 | A10,0 | 400 - 650<br>350 - 575<br>300 - 500 |
| Bois issu de l'entretien du paysage | BEP[1)] | 31<br>45<br>63 | 30 - 60 | 0,4 - 1,0<br>(0,5) | F25 | A10,0 | 400 - 800<br>350 - 750<br>300 - 700 |
| Sous-produits forestiers de conifères et de feuillus Ø <80 mm et bois de houppier | SPF | 31<br>31<br>45<br>45<br>63<br>63 | 30 - 60 | 0,4 - 1,0<br>(0,6) | F25 | A10,0 | BT : 400 - 650<br>BD : 650 - 900<br>BT : 350 - 600<br>BD : 600 - 850<br>BT : 300 - 550<br>BD : 550 - 800 |
| Copeau de scierie | CS | < 4 | 35 - 50 | 0,1 - 0,3<br>(0,1) | - | A3.0 | BT : 450 - 550<br>BD : 650 - 750 |
| Écorce déchiquetée[8)] Fraction grossière maximale 5 % | ED | 45<br>45<br>63<br>63 | 30 - 65+ | 0,3 - 0,9<br>(0,5) | F05<br>F05<br>F05<br>F05 | A10.0 | BT : 700 - 850<br>BD : 950 - 1 150<br>BT : 650 - 800<br>BD : 900 - 1 100 |
| Écorce non déchiquetée[8] | END | à conv. | 30 - 65+ | 0,3 - 0,9<br>(0,5) | F05 | A10.0 | - |
| Sous-produits de la transformation du bois[10)] | SPT | à conv. | à conv. | à conv. | à conv. | à conv. | - |
| Bois de récupération[4) 10)] | AH | 45<br>63 | < 30 | 0,5 - 1,5<br>(0,8)[12)] | F10<br>F10 | A10.0 | 550 - 750<br>500 - 700 |
| Pellets (granulés) [5] | PEL | à conv. | - | - | - | - | - |

Tableau 4.11 Partie II - Classification des combustibles et des tailles de particules des centrales de chauffage au bois M sur la base des spécifications de la norme EN ISO 17225-1, la classification des tailles de particules a été complétée par les classes S de la norme EN ISO 17225-4.

La classification est basée autant que possible sur la norme ISO 17225 relative aux combustibles, les écarts sont mentionnés.

1) Sauf accord contractuel, ne doit pas contenir de peuplier ni de saule ; teneur maximale en écorce adhérant aux plaquettes : 20 % en poids sans eau.
2) Conformément à la norme CEN/TS 14588. Plaquettes de bois produits comme sous-produit de l'industrie de transformation du bois, avec ou sans écorce. En Suisse, seules les plaquettes de bois naturels issus de résidus de sciage sont considérés comme des plaquettes de bois issus de résidus industriels (RI).
3) La classification de la teneur en eau ne correspond pas à la norme ISO 17225 relative aux combustibles.
4) DE : catégorie de bois usagé A I et A II ; AT : concept sectoriel bois usagé Q3 et Q4 ; CH : Le bois usagé n'est pas considéré comme un combustible bois (ordonnance sur la protection de l'air : annexe 5, chiffre 3, alinéa 2, lettre a).
5) Respecter les normes ISO 17225-2 relatives aux granulés
6) La plage de variation est déterminée par différentes densités apparentes :
   - le déchiquetage de bois ronds permet d'obtenir une densité apparente plus élevée que le broyage d'arbres entiers avec leurs branches
   - La taille des plaquettes de bois dans la fraction principale de 60 % influence la densité apparente (une proportion plus élevée de plaquettes fines augmente la densité apparente)
   - Le procédé de préparation du combustible par broyage ou déchiquetage a une grande influence sur la densité apparente (le combustible déchiqueté présente une densité apparente inférieure à celle du combustible broyé)
7) Y compris feuilles, aiguilles et branches
8) Les valeurs numériques (classe P) de de dimensions correspondent à la granulométrie des particules (au moins 95 % en masse) passant à travers un tamis à trous ronds (ISO 17827-1). Si un échantillon répond aux critères de plusieurs classes, le rattacher à la classe la plus basse possible. La fraction grossière ≤ 5 % en masse à la livraison.
9) Respecter les exigences renforcées pour les plaquettes de qualités selon les normes spécifiques aux pays.
10) Pour les résidus de bois issus de la transformation du bois RHH et les déchets de bois AH, la composition chimique doit être déterminée sur la base d'analyses de combustible conformément à la norme EN ISO 17225-1, tableau 5b, page 24 et annexe B, tableau B.1, page 43. Pour les déchets de bois, outre la teneur maximale en cendres, la teneur maximale en matières étrangères (m.-% sur une base anhydre) provenant du sable, des pierres et du verre doit également être indiquée.
11) La teneur en azote est indiquée sous forme d'une plage de valeurs, avec une valeur typique entre parenthèses. La valeur typique est importante pour la conception du système de dénitrification.
12) La teneur en azote du bois usagé dépend de sa composition (proportion de bois usagé naturel et de matériaux en panneaux [MDF, panneaux agglomérés, contreplaqué, etc.]). Pour les matériaux en panneaux purs, il faut compter avec une teneur en azote maximale de 6 %.

à conv. : à convenir, déterminé au cas par cas
BT : bois tendre (résineux : épicéa, sapin, pin, douglas, mélèze ; feuillus tendres : érable, cerisier, aulne)
BD : bois dur (feuillus durs : chêne, hêtre, orme, châtaignier, frêne, robinier, charme (hêtre commun), noisetier, bouleau, noyer, arbres fruitiers [sauf cerisier])
Pour tous les combustibles : $H_u$ > 1,5 kWh/$kg_{humide}$

| Classification de la taille des particules de plaquettes de bois et de bois broyé grossier | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Taille des particules** | **Partie principale*** min. 60 %/95 %[1)] | **Partie fine*** < 3,15 mm | **Partie grossière*** | **Longueur maximale des particules** | **Section transversale des particules surdimensionnées** |
| P16S | 3,15 mm - 16 mm | F15 | > 31,5 mm, ≤ 6 % | ≤ 45 mm | < 2 cm² |
| P31S | 3,15 mm - 31,5 mm | F10 | > 45 mm, ≤ 6 % | ≤ 120 mm | < 4 cm² |
| P31 | 3,15 mm - 31,5 mm | F25[2)] | > 45 mm, ≤ 6 % | ≤ 200 mm | < 4 cm² [4)] |
| P45S | 3,15 mm - 45 mm | F10 | > 63 mm, ≤ 10 % | ≤ 200 mm | < 6 cm² |
| P45 | 3,15 mm - 45 mm | F25[2)] | > 63 mm, ≤ 10 % | ≤ 350 mm | < 6 cm² [4)] |
| P63 | 3,15 mm - 63 mm | [3)] | > 100 mm, ≤ 10 % | ≤ 350 mm | < 8 cm² [4)] |
| P100 | 3,15 mm - 100 mm | [3] | > 150 mm, ≤ 10 % | ≤ 350 mm | < 12 cm² [4)] |

1) Les valeurs numériques de dimension se rapportent aux tailles de particules (fraction massique d'au moins 60 %) passant à travers un tamis à trous ronds de la taille indiquée (ISO 17827-1). Pour les écorces déchiquetées et non déchiquetées, la fraction principale, y compris la fraction fine, doit avoir une fraction massique de 95 %. Utiliser les classes S pour les plaquettes de bois et le combustible bois broyé pour des applications commerciales à petite échelle et en habitations. La classe de propriété la plus basse possible doit être indiquée.
2) Y compris aiguilles, feuilles et branches
3) Proportion de fines variable en fonction du combustible
4) Recommandation s'écartant de la norme : pour les systèmes de transport et d'alimentation en combustible à vis sans fin

* Taille des particules en % massique à la livraison

## 4.5.5 Stratégies d'approvisionnement

Les différentes étapes de traitement pour la mise à disposition du bois-énergie comprennent la récolte du bois (abattage, ébranchage, débardage), le déchiquetage (broyage), le transport vers le silo ou le stockage intermédiaire, ainsi que, le cas échéant, le stockage intermédiaire, le transbordement et le transport. L'effort nécessaire dépend principalement du volume à traiter et non du poids. C'est pourquoi les prix par contenu énergétique sont généralement 10 à 15 % plus élevés pour le bois résineux que pour le bois de feuillu dur. Le choix de la stratégie d'approvisionnement dépend notamment des conditions locales (emplacement et accessibilité, marché et demande en combustible, logistique existante, entreprises d'approvisionnement en combustible et infrastructure, etc.) et doit être adapté aux exigences respectives.

Si le bois est transformé en plaquettes dans la forêt (à partir d'une pile de bois ronds ou fraîchement abattu) et transporté de là vers le consommateur, on parle d'une **chaîne d'approvisionnement directe**. L'absence d'entrepôt intermédiaire en fait l'option d'approvisionnement la plus économique. Elle nécessite toutefois une logistique de combustible fiable et planifiée avec précision, et il faut veiller à ce que la sécurité d'approvisionnement soit garantie même dans des conditions extrêmes, telles que les conditions météorologiques et routières hivernales. Il faut également tenir compte du fait que les plaquettes de bois fraîchement déchiquetées peuvent avoir une teneur en eau pouvant atteindre 60 %.

Contrairement à la procédure décrite ci-dessus, dans une **chaîne d'approvisionnement indirecte,** le bois-énergie est stocké temporairement sous forme de plaquettes ou de bois ronds dans un hangar ou sur un site de stockage situé directement à proximité de la centrale de chauffage ou sur des sites externes après avoir été extrait de la forêt. Le stockage intermédiaire augmente la sécurité d'approvisionnement, offre une plus grande flexibilité en matière de livraison et d'achat de combustible et permet d'adapter le mélange de combustibles utilisé en fonction des conditions d'exploitation et de la saison. En particulier dans les zones de haute altitude où l'accès à la forêt ou à la centrale de chauffage est limité en hiver, des entrepôts situés directement à proximité de la centrale sont nécessaires pour garantir la sécurité d'approvisionnement. Pendant le stockage, le combustible est préséché et la grande flexibilité dans l'achat de combustible peut entraîner des avantages en termes de prix. Cependant, les coûts de mise à disposition augmentent en raison de l'augmentation des investissements et des manipulations nécessaires. Certains combustibles, tel que ceux mentionnés dans le Tableau 4.10, par exemple les plaquettes de bois de qualité ou les combustibles séchés et tamisés, ne peuvent généralement être fournis que par une chaîne d'approvisionnement indirecte. Il convient d'en tenir compte lors du choix du combustible ou de la chaudière et d'en discuter avec le fournisseur de combustible (voir chapitre 13).

En combinant les deux variantes (**chaîne d'approvisionnement mixte**), les entrepôts de stockage intermédiaire de combustible peuvent être de plus petite taille, ce qui permet de réduire les coûts. Dans le même temps, une sécurité d'approvisionnement élevée est garantie. Si la construction d'un entrepôt de stockage intermédiaire est nécessaire, il convient d'examiner si un espace de stockage aussi grand que possible peut être aménagé pour alimenter plusieurs chaudières à bois afin de tirer parti des synergies. Outre les plaquettes de bois, les bois ronds peuvent également être stockés dans un parc à bois et déchiquetés en plaquettes si nécessaire.

**Assortiments mixtes** : même les assortiments présentant des propriétés défavorables peuvent être utilisés en les mélangeant à des qualités supérieures. On peut par exemple combiner de l'écorce à forte teneur en eau avec des résidus de bois secs ou du bois d'entretien du paysage ayant tendance à former des scories avec des plaquettes de bois pauvres en cendres. Les combustibles mixtes sont généralement peu coûteux et gagnent en importance. Afin de garantir le bon fonctionnement de l'installation, les mélanges de combustibles autorisés doivent être déterminés en fonction de la charge de la chaudière avec le fabricant de la chaudière. La teneur en eau du mélange de combustibles est un critère particulièrement important, tant en fonctionnement à puissance nominale qu'en fonctionnement à faible charge (puissance thermique absorbée < puissance minimale de l'installation de combustion).

## 4.6 Analyse

La méthode standard utilisée pour déterminer la **teneur en eau** consiste généralement à mesurer la masse des combustibles par gravimétrie après séchage à 105 °C, conformément aux normes DIN EN ISO 18134-1 [45] et DIN EN ISO 18134-2 [46] (méthode simplifiée). La teneur en eau peut être calculée à partir de la perte de masse du combustible lors du séchage jusqu'à ce que son poids reste constant. Cette méthode est reconnue et précise, mais elle demande beaucoup de temps et de travail. Dans la pratique, tant les entreprises d'approvisionnement en combustible que les exploitants de centrales thermiques ont souvent besoin de déterminer la teneur en eau le plus rapidement possible, par exemple pour une facturation transparente lors de l'achat et de la vente ou pour l'évaluation de la qualité d'une livraison. Il existe sur le marché une multitude d'appareils de détermination rapide à cet effet. Ces appareils déterminent la teneur en eau du combustible de différentes manières : par gravimétrie, par voie électrique ou par rayonnement infrarouge. De plus, la mesure peut être effectuée de différentes manières, par exemple sous forme de mesure manuelle ou automatique sur un échantillon immobile ou dans le flux de matière, de manière mobile ou stationnaire. Les méthodes de mesure rapide n'atteignent pas la précision d'une détermination en étuve. Ils ne sont donc pas vraiment adaptés à des fins de facturation. Cependant, ils fournissent des valeurs suffisamment précises pour l'évaluation qualitative d'un lot de combustible [47].

La détermination de **la teneur en cendres** des biomasses est effectuée selon la norme DIN EN ISO 18122 [48]. En laboratoire, un échantillon est chauffé (brûlé) à 550 °C dans un four à moufle avec une vitesse de chauffage prescrite dans une atmosphère oxydante. Le résidu de combustion est pesé, et la teneur en cendres est calculée à partir du rapport massique entre les cendres et le combustible.

La détermination du **pouvoir calorifique** s'effectue de manière standard en laboratoire selon la norme EN ISO 18125:2017-08 [24] dans un calorimètre à bombe. Une quantité pesée de l'échantillon d'analyse d'un combustible y est brûlée dans de l'oxygène sous haute pression dans des conditions définies.

## 4.7 Contrat de livraison de combustible et facturation

### 4.7.1 Contrat de fourniture de combustible

Le contrat de fourniture de combustible est conclu entre la société exploitante de la chaufferie et l'entreprise de fourniture de combustible et vise à garantir la livraison ininterrompue des combustibles adaptés à l'installation de chauffage. Le contrat doit préciser les points fondamentaux suivants :

- Définition des assortiments de combustibles
- Quantités livrées et proportions des assortiments, modalités de livraison
- Prix du combustible, ajustement du prix (indexation) et mode de facturation
- Durée du contrat et délais de résiliation, for juridique

Lors de l'achat et de la vente de bois-énergie, la quantité d'énergie négociée est déterminante. Celle-ci dépend toutefois de différents paramètres du combustible (densité, densité apparente, teneur en eau, essence de bois). Selon la structure de l'approvisionnement en combustible (un ou plusieurs fournisseurs) et l'infrastructure disponible à la centrale thermique, différentes méthodes de facturation (selon le volume, le poids ou la quantité de chaleur produite) peuvent être envisagées.

### 4.7.2 Facturation au volume

La facturation au volume est très répandue. Le prix d'une livraison est fixé à partir de valeurs indicatives du pouvoir calorifique par mètre cube en vrac pour différents types de bois en fonction de leur teneur en eau. Il s'agit toutefois de la méthode la moins précise, car le pouvoir calorifique des combustibles livrés peut varier considérablement en raison des fluctuations de la densité (des matières solides), de la densité apparente et de la teneur en eau. Par exemple, un mètre cube de plaquettes de hêtre contient près de 50 % d'énergie en plus qu'un mètre cube de plaquettes d'épicéa. Les différentes densités du bois feuillu et du bois résineux constituent donc un critère de distinction important pour la facturation au volume. Les bois tendres tels que l'épicéa, le sapin, le pin, le douglas, le mélèze (bois résineux en général) ainsi que les bois feuillus tendres tels que le cerisier et l'aulne ont des densités (énergétiques) plus faibles que les bois durs (généralement des feuillus : érable, chêne, hêtre, orme, châtaignier, frêne, robinier, charme, noisetier, bouleau, noyer, arbres fruitiers – à l'exception du cerisier). Sur la base de cette fourchette de variation, la Figure 4.5 montre, à titre d'exemple, pour les essences de bois les plus courantes, la fourchette dans laquelle peut se situer le contenu énergétique par unité de volume (en fonction de la teneur en eau du combustible), ainsi que les fourchettes de prix pour la facturation au volume des plaquettes de bois, sur la base d'un prix moyen indicatif de 30 €/MWh [49].

Cependant, la densité apparente du combustible a une influence encore plus grande que la densité variable des matières solides dans le commerce des plaquettes de bois. Celle-ci est essentiellement déterminée par la taille des particules, la proportion de fines et des influences extérieures telles que le compactage par vibration pendant le transport. La norme DIN EN ISO 17225-1 indique des densités apparentes pour les plaquettes de bois comprises entre 150 kg/m$^3$v et 450 kg/m$^3$v. Une connaissance insuffisante de la teneur en eau ou de la densité apparente du combustible peut facilement entraîner des écarts de prix importants. C'est pourquoi cette méthode de facturation n'est pas recommandée, ou seulement à condition que les paramètres du combustible soient connus avec suffisamment de précision.

Avantage du calcul en fonction du volume :

- Détermination simple du volume

Inconvénient de la facturation au volume :

- Grande incertitude quant à la teneur énergétique

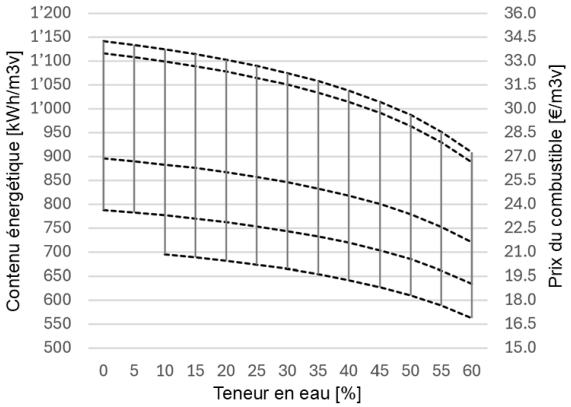



Figure 4.5 Contenu énergétique par volume et valeurs indicatives pour les prix des plaquettes de bois en fonction de la teneur en eau pour différents types de bois (base de calcul 30 €/MWh.)[25].
De haut en bas :
Chêne (densité apparente 571 kg/m$^3$p$_{wf}$)
Hêtre (558 kg/m$^3$$_{wf}$)
Pin (431 kg/m$^3$p$_{wf}$)
Épicéa (379 kg/m$^3$p$_{wf}$)
Peuplier (353 kg/m$^3$p$_{wf}$)

### 4.7.3 Facturation au poids

Dans le cas d'une facturation au poids, courante pour les grandes installations, la teneur en eau du combustible est prise en compte. Le prix d'une livraison est fixé en fonction du contenu énergétique par tonne de combustible sec. Par exemple, les plaquettes de bois fraîchement coupées provenant de la forêt, dont la teneur en eau est de 50 %, ont un pouvoir calorifique de 2,3 kWh/kg (Figure 4.6). Pour une livraison de 20 tonnes, cela correspond à une quantité d'énergie de 46 MWh. Pour un prix moyen de 30 €/MWh, le prix d'un camion de 20 tonnes est de 1'380 €.

Alors que la teneur en eau a une influence considérable sur la quantité d'énergie commercialisée, les pouvoirs calorifiques par rapport à la masse diffèrent peu entre les

résineux et les feuillus. En raison de leur teneur plus élevée en résines et en lignine, le pouvoir calorifique des résineux dépasse généralement légèrement celui des feuillus (par rapport à la masse). En tant que combustible naturel, ces valeurs sont toutefois soumises à des fluctuations naturelles (Tableau 4.9, Figure 4.6).

Le poids est généralement déterminé en pesant le camion avant et après le déchargement. Si des capteurs de poids intégrés au camion sont utilisés, le fournisseur doit garantir une précision suffisante. Pour obtenir une détermination représentative de la teneur en eau d'une livraison (chapitre 4.6), il convient d'analyser soit plusieurs échantillons, soit un échantillon composite représentatif.

Avantages de la facturation au poids :

- Indépendant du type de bois et de la densité apparente
- Grande précision en ce qui concerne le contenu énergétique

Inconvénient de la facturation au poids :

- Mesure du poids et de la teneur en eau nécessaire

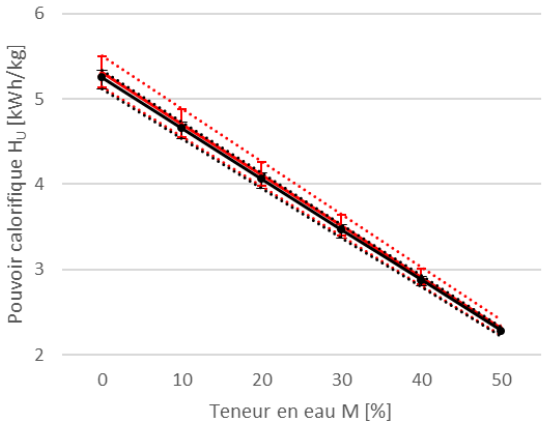



Figure 4.6 Pouvoir calorifique massique du bois résineux (rouge) et du bois feuillu (noir) en fonction de la teneur en eau.

### 4.7.4 Facturation en fonction de la quantité de chaleur produite

La facturation en fonction de la quantité de chaleur produite nécessite un compteur de chaleur dans le circuit primaire de la chaudière, capable de mesurer la quantité de chaleur libérée dans l'installation. Celui-ci doit être installé de manière professionnelle, conformément aux directives techniques relatives aux compteurs de chaleur, et fonctionner correctement (voir également le chapitre 7.4.3). Il existe toutefois une différence entre le contenu énergétique du combustible et la quantité d'énergie mesurée, qui est due aux pertes techniques de l'installation. Les parties contractantes doivent donc définir la procédure de facturation dans le contrat de fourniture. Par exemple, un prix du combustible en € par MWh de chaleur produite est convenu pour un rendement annuel défini de l'installation (par exemple 85 %). Le rendement annuel est déterminé à l'aide d'une formule qui tient compte du rendement de la chaudière et des pertes à l'arrêt (chapitre 20.12). Si le rendement annuel réel s'écarte de la valeur convenue, le prix du combustible est ajusté de manière linéaire.

Ce type de facturation suppose que la totalité du combustible utilisé (dans un circuit de chauffage équipé d'un compteur de chaleur) soit achetée auprès d'une seule entreprise. Dans le cadre d'un contrat de livraison correspondant, un relevé périodique de la quantité de chaleur produite suffit alors pour facturer le combustible livré. D'autres méthodes ou des méthodes modifiées (p. ex. avec prise en compte de critères de qualité supplémentaires ou de plusieurs entreprises d'approvisionnement) peuvent toutefois également être utilisées.

La facturation en fonction de la quantité de chaleur produite présente un faible risque pour la société exploitante de la centrale, car les pertes dues aux fluctuations du pouvoir calorifique, par exemple en raison de la dégradation du combustible liée au stockage, sont supportées par le fournisseur de combustible. L'entreprise d'approvisionnement en combustible doit donc veiller à ce que les conditions de stockage dans l'installation soient appropriées ou à ce que la livraison soit effectuée juste à temps.

Avantages de la facturation en fonction de la quantité de chaleur :

- Indépendant de la teneur en eau
- Indépendant de l’essence du bois et de la densité apparente

Inconvénients de la facturation en fonction de la quantité de chaleur :

- Dépend du rendement annuel de l'installation
- Estimation du rendement annuel nécessaire

# 5 Composants de la production de chaleur

## 5.1 Domaines d'application

Les chaudières à bois automatiques sont proposées dans une large gamme de puissances (Figure 5.1). La gamme s'étend du chauffage d'une maison individuelle aux chaudières de centrales électriques d'une puissance thermique de combustion supérieure à 100 MW. Les applications les plus courantes des chaudières à bois se situent dans la plage de puissance moyenne comprise entre 200 kW et 2 MW, où les plaquettes de bois provenant de la forêt et les résidus de bois issus de la transformation du bois sont utilisés comme combustible. Les principes de base, les domaines d'application et les types de construction les plus courants des principaux types de combustion sont décrits ci-dessous. Le combustible utilisé et la technologie de combustion sont interdépendants. C'est pourquoi l'évaluation de l'assortiment de bois-énergie selon des critères techniques est déterminante pour le choix et l'exploitation des systèmes de combustion automatique du bois. Ces critères comprennent la taille des particules, la proportion admissible de longueurs excessives, d'écorce et de fines, ainsi que la teneur en eau (chapitre 4).

Le Tableau 5.1 donne un aperçu des principaux types de chaudières à bois, de leurs plages de puissance habituelles et des combustibles utilisés. Le chapitre13 traite plus en détail du choix de la technologie de combustion appropriée en fonction du combustible disponible.

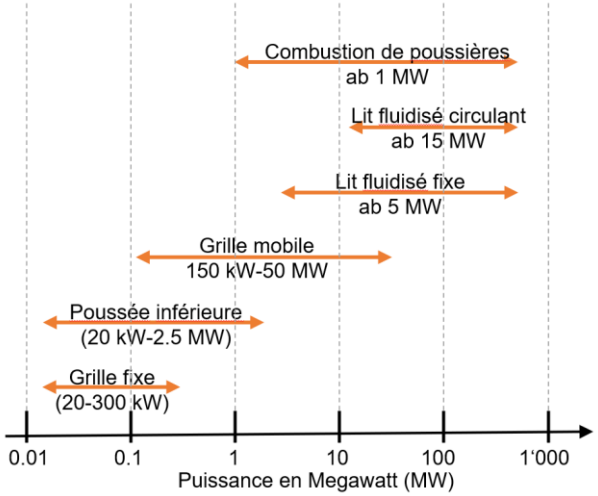



Figure 5.1 Domaines d'application des principaux types de chauffage au bois.

Tableau 5.1 Domaines d'application des principaux types de chauffage au bois

| Type | Niveau de puissance | Combustibles | Teneur en eau [%] | Teneur en cendres [%wf] |
|---|---|---|---|---|
| Foyer à grille fixe | 20 kW - 300 kW | Plaquettes de bois | 10 - 35 | |
| Foyer à poussée inférieure (foyer volcan) | 20 kW - 2.5 MW | Plaquettes de bois, copeaux de scierie, pellets, teneur maximale en poussière : 50 % | 5 – 50* | < 2 |
| Foyer à grille mobile | 150 kW - 50 MW | Pellets, plaquettes de bois et la plupart des biomasse, teneur maximale en poussière : 50 % | 5 - 60 | < 50 |
| Lit fluidisé fixe | Dès 5 MW<br>Dès 20 MW | Différentes biomasses<br>Diamètre < 10 mm<br>Diamètre < 80 mm | 5 - 60 | < 10 |
| Lit fluidisé circulant | 15 MW - 100 MW | Différentes biomasses<br>Diamètre < 10 mm | 5 - 60 | < 10 |
| Foyer à injection de poussière | 1 MW - 100 MW | Différentes biomasses<br>Diamètre < 5 mm | En général < 20 | < 2 |

* Généralement jusqu'à M35, mais peut aller jusqu'à M50 si la zone de combustion non refroidie est suffisamment longue. %wf = % sans eau.

## 5.2 Principes fondamentaux de la combustion

Lors de la combustion dans des installations énergétiques, l'énergie contenue dans le combustible doit être entièrement libérée. Cela nécessite une combustion complète. Les installations de combustion doivent donc être conçues et dimensionnées de manière à permettre une combustion complète, même lorsque la qualité du combustible varie. La tâche de l'exploitant de l'installation consiste alors à faire fonctionner l'installation de manière à obtenir une combustion complète, afin que les composants organiques du combustible soient transformés autant que possible en $CO_2$ et $H_2O$. Le processus de combustion des combustibles solides peut être subdivisé en plusieurs sous-processus (Figure 5.2) :

- Chauffage et séchage
- Dégazage et pyrolyse
- Combustion des composants combustibles volatils
- Combustion des composants combustibles solides

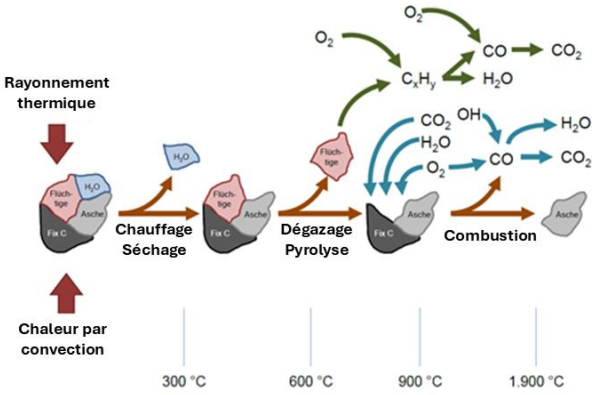



Figure 5.2 Schéma simplifié du processus de combustion.

Selon le type de combustion, les sous-processus représentés ne doivent pas nécessairement se dérouler les uns après les autres, mais peuvent également se chevaucher en partie. Au début du processus de combustion, l'eau contenue dans le combustible s'évapore, c'est-à-dire que le combustible est chauffé et séché. Au fur et à mesure que le combustible continue à chauffer, la pyrolyse commence, les composants volatils du combustible s'échappent et passent à l'état gazeux. Il en résulte un mélange gazeux inflammable, de sorte que la combustion commence lorsque la température d'inflammation correspondante est atteinte. Au cours du processus, les composants solides restants du combustible réagissent également avec l'oxygène disponible dans l'air de combustion. Dans cette transformation chimique des composants organiques du combustible, on distingue les réactions homogènes (les deux réactifs sont gazeux) et les réactions hétérogènes (réaction entre une phase solide et une phase gazeuse). La combustion hétérogène des combustibles solides est beaucoup plus complexe et exigeante que la combustion homogène des combustibles gazeux, comme le gaz naturel.

## 5.3 Technologies de combustion

### 5.3.1 Aperçu

Les technologies de combustion les plus courantes dans les centrales de chauffage (et de cogénération) à biomasse sont présentées ci-dessous. Elles peuvent être classées en trois grandes catégories: les combustions à lit fixe, les combustions à lit fluidisé et les combustions de poussières (Figure 5.).

La chaleur nécessaire au séchage et au dégazage est fournie de différentes manières pendant le fonctionnement du chauffage, en fonction du type de combustion. Dans les foyers à poussières, les particules de combustible entrantes sont mises en contact avec des gaz d'échappement chauds. Dans les fours à lit fluidisé, la chaleur est transférée par des particules solides dans le lit fluidisé. Dans ces cas, le transfert de chaleur se fait donc par convection. Dans les foyers à grille, l'apport de chaleur se fait principalement par le rayonnement des parois environnantes de la chambre de combustion. Au démarrage de la combustion, l'allumage du combustible s'effectue soit à l'aide de soufflerie électriques à air chaud (combustibles à faible teneur en eau < 35 %, installations de petite puissance jusqu'à 900 kW), soit à l'aide de brûleurs d'allumage à gaz (puissances supérieures > 900 kW, humidité maximale du combustible d'environ 55 %).

Il convient de distinguer les appareils standards de série des chaudières industrielles personnalisées. Plus la qualité du combustible se détériore, c'est-à-dire plus le matériau est humide, plus sa granulométrie est irrégulière et grossière, plus il contient d'aiguilles, d'écorce et de feuilles et, le cas échéant, plus il contient de matières étrangères, plus il faut utiliser une technologie robuste et sophistiquée. Cette technologie complexe est techniquement réalisable dans une certaine mesure pour les petites installations. De plus, la technologie nécessaire entraîne des coûts d'investissement spécifiques plus élevés (€/kW de puissance installée).

Si les coûts d'investissement spécifiques des appareils de série sont relativement faibles, ces installations sont très exigeantes en termes de qualité du combustible. Les appareils standards de série conviennent aux combustibles secs, par exemple les plaquettes de bois dont la teneur en eau est inférieure à 35 %, et sont généralement disponibles jusqu'à une puissance de 500 kW, rarement jusqu'à 1’500 kW. Le combustible sec et fluide peut être transporté vers la chaudière à l'aide de systèmes d’extraction de silos peu coûteux. Ces appareils ne conviennent pas aux plaquettes de bois fraîchement coupés en forêt. L'expérience montre qu'il existe un risque d'incendie de cheminée, de dépassement des valeurs limites d'émission, d'augmentation de la pollution et de l'usure des installations, de nuisances olfactives et de problèmes d'évacuation des plaquettes du silo lorsque le combustible est trop humide. Les systèmes de combustion pour plaquettes de bois frais ont également évolué dans la gamme de puissance faible > 150 kW. Si les coûts d'investissement spécifiques pour la chaudière sont ici plus élevés (jusqu'à 50 % pour une puissance de chaudière identique), ces chaudières industrielles offrent toutefois une flexibilité nettement supérieure en termes de combustibles. Des coûts d'investissement plus élevés peuvent être compensés par des coûts de combustible plus faibles, en particulier en combinaison avec de longues durées de fonctionnement.

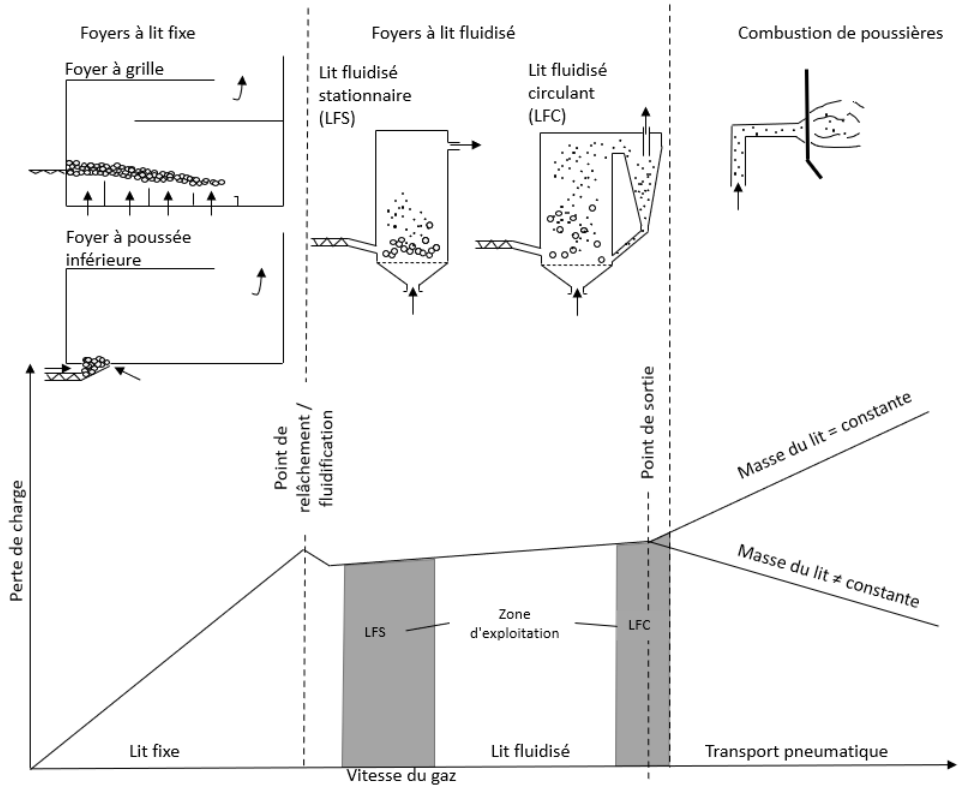



Figure 5.3 Aperçu des technologies de combustion. Classification en fonction de la vitesse d'écoulement du gaz combustible à travers l'installation et du type de transport du combustible.

## 5.3.2 Chaudières à lit fixe

Dans le cas d'un **foyer à poussée inférieure** (Figure 5.), le combustible est introduit par le bas dans un creux (cornue) à l'aide d'une vis sans fin. C'est là que s'effectuent le séchage et le dégazage du combustible ainsi que la combustion du charbon de bois. Pour une oxydation complète des gaz combustibles, de l'air secondaire est ajouté avant l'entrée dans la chambre de postcombustion chaude et mélangé aux gaz de combustion chauds. Dans l'échangeur de chaleur en aval, les gaz d'échappement chauds sont refroidis et épurés. Les cendres de grille doivent généralement être retirées manuellement, mais il existe également sur le marché des foyers équipés de systèmes de décendrage automatiques, qui disposent d'une grille de postcombustion mobile et d'une vis de décendrage. La puissance nominale des chaudières à foyer inférieur est limitée à environ 2,5 $MW_{th}$. Ils sont particulièrement adaptés aux combustibles ligneux à grains fins tels que la sciure, les granulés ou les plaquettes (granulométrie maximale de 50 mm) avec une teneur en eau de 5 à 50 %. La conception de la chambre de combustion et de la chambre de postcombustion doit être adaptée à la teneur en eau. Les combustibles riches en cendres posent des problèmes d'évacuation des cendres hors de la chambre de combustion chaude. De plus, des couches de cendres agglomérées ou fondues à la surface du combustible peuvent bloquer temporairement la sortie des gaz de combustion du lit de braises, ce qui entraîne des conditions de combustion instables à chaque passage de gaz. Les coûts d'investissement des foyers à poussée inférieure sont inférieurs à ceux des foyers à grille.

L'alimentation continue en combustible et un lit de combustion stable et calme permettent une régulation simple et efficace de la puissance et un fonctionnement à faible charge avec de faibles émissions. Ce type de construction est toutefois de moins en moins utilisé.

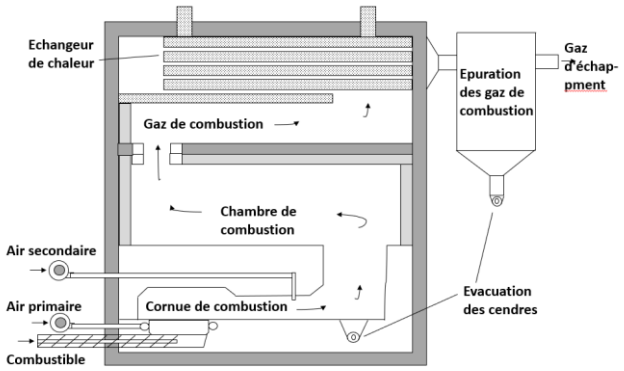



Figure 5.4 Principe de fonctionnement d'un foyer à poussée inférieure.

Les chaudières à bois entièrement automatiques utilisent souvent des chaudières à grille avec **des grilles basculantes** (Figure 5.). Celles-ci peuvent être composées d'un à trois éléments rotatifs. Il n'y a pas de mouvement actif du combustible sur la grille. Le combustible est poussé à l'état fermé (1) sur la grille, qui forme la

base d'un lit de braises stable. Après une certaine durée de fonctionnement (p. ex. 8 heures), l'alimentation en combustible est arrêtée. Ensuite, la grille entière ou un de ses éléments est basculé sur le côté et ouvert (2). Les cendres tombent vers le bas. Une zone de braises résiduelles subsiste sur la partie de la grille qui n'a pas été basculée. Cela permet d'économiser de l'énergie pour un nouvel allumage après la fermeture de la grille. Une grille basculante à deux éléments est également appelée grille à brise-étages. L'ouverture des deux éléments permet un nettoyage complet de la chambre de combustion.

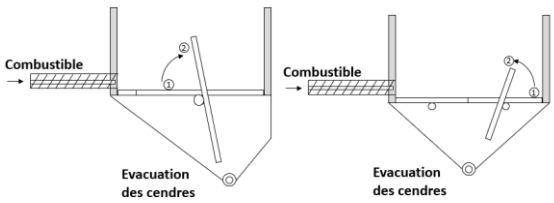



Figure 5.5 Principe de fonctionnement du chargement du combustible et du décendrage avec une grille basculante (à gauche) ou une grille à brise-étages (à droite) ; (1) position fermée, (2) position ouverte.

Dans le cas d'une **grille à alimentation continue** (Figure 5.), le combustible est poussé horizontalement sur la grille (vis sans fin ou alimentation hydraulique) et transporté à travers la chambre de combustion par le mouvement des éléments de la grille. Le décendrage s'effectue à l'extrémité de la grille. Une partie de l'air de combustion est amenée sous forme d'air primaire à travers la grille, qui peut être divisée en plusieurs zones. Le séchage du combustible s'effectue dans la première zone, suivi du dégazage dans la zone centrale (il s'agit de la zone de combustion principale) et de la combustion du charbon de bois dans la dernière zone. Une alimentation en air primaire contrôlée par zone à travers la grille permet de s'adapter au comportement de combustion du combustible, d'assurer un fonctionnement continu à charge partielle et de créer une atmosphère réductrice dans la zone de combustion primaire. L'air secondaire est mélangé au-dessus de la grille ou, pour une réduction plus efficace des $NO_x$, avec une séparation spatiale dans la zone de combustion secondaire avec les gaz combustibles pour la combustion dans la chambre de combustion suivante.

La grille assure le transport du combustible ainsi que son aération et son brassage afin d'homogénéiser le lit de combustion et d'améliorer la circulation de l'air. Afin de garantir une alimentation en air primaire uniforme des différentes zones de la grille, il est nécessaire que le combustible soit réparti de manière aussi homogène que possible sur la grille. Pour un fonctionnement efficace, il est donc essentiel de régler correctement les cycles d'avance des différents éléments de la grille afin d'assurer un mouvement lent et régulier de celle-ci. Une répartition non homogène peut entraîner la formation de scories, la remise en suspension de particules non brûlées et une forte proportion de cendres volantes. Cela nécessite un excès d'air plus important pour obtenir une combustion complète (formation de stries). Une fréquence de mouvement trop élevée des éléments de la grille entraîne la présence de charbon de bois non brûlé dans les cendres ou une charge insuffisante de combustible sur la grille. Des barrières lumineuses infrarouges réparties sur les différentes zones de la grille sont utilisées pour contrôler la hauteur du lit de braises et réguler les cadences d'avance.

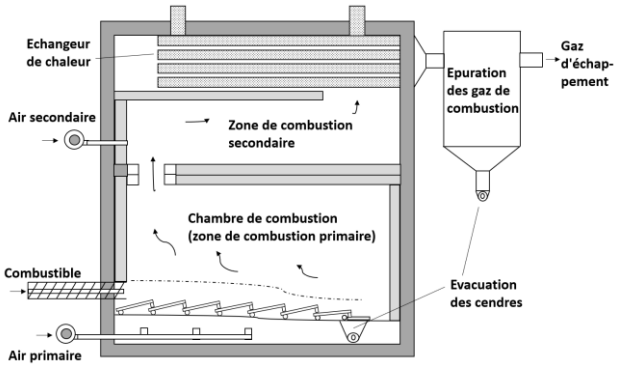



Figure 5.6 Principe de fonctionnement d'un foyer à grille à avance.

Les foyers à grille conviennent aux combustibles à forte teneur en cendres, de granulométrie variable et à forte teneur en eau. Une partie de l'énergie libérée lors de la combustion est nécessaire pour évaporer l'eau contenue dans le combustible. Une enveloppe rayonnante au-dessus du combustible assure une température de dégazage élevée. Pour l'utilisation de combustibles dont la teneur en eau est supérieure à 50 %, le foyer doit impérativement être équipé d'un conduit de combustion non refroidi. Les foyers à grille mobile sont principalement réalisés selon le principe du contre-courant. Cela permet une recirculation ciblée des gaz de combustion. Dans le cas de combustibles à forte teneur en eau, les gaz de combustion chauds sont en outre renvoyés sur la grille recouverte de combustible frais, de sorte qu'un préséchage du combustible a lieu dans la première zone de la grille. Il est ainsi possible d'utiliser des combustibles contenant jusqu'à 60 % d'eau. En outre, deux autres types de géométries de chambre de combustion sont distingués en fonction du sens de déplacement du combustible et des gaz : à courant parallèle et à courant central (Figure 5.).

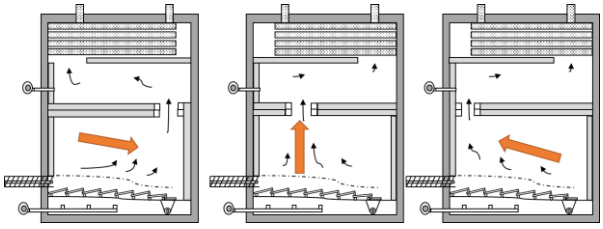


Figure 5.7 Principes de construction des foyers à grille; à courant parallèle (à gauche), à courant central (au milieu) et à contre-courant (à droite).

À l'aide de ventilateurs, l'air de combustion primaire est introduit par le bas à travers la grille et le lit de combustion, et

l'air secondaire dans la zone de postcombustion. L'apport d'air aux différents endroits est assisté par un ventilateur d'évacuation des gaz brûlés qui assure une dépression dans l'ensemble du système. Une granulométrie homogène des plaquettes de bois avec une faible proportion de fines est importante pour une alimentation en air régulière et une combustion à faibles émissions. Dans les centrales de chauffage au bois, les grilles d'alimentation inclinées et horizontales sont les plus courantes. La grille est composée d'éléments fixes et mobiles alternés. Le transport du combustible s'effectue par un mouvement périodique de va-et-vient des éléments mobiles de la grille. Cela permet de mélanger les particules de combustible brûlées et non brûlées, de renouveler la surface du lit de combustion et d'obtenir une répartition homogène du combustible sur la grille. La grille à avance horizontale est équipée d'éléments inclinés. Leur mouvement permet d'obtenir une répartition très homogène du combustible sur la grille et d'éviter en grande partie la formation de scories due à une surchauffe locale. Elle présente l'avantage d'être plus compacte que la grille à avance inclinée.

Dans le cas de combustibles à faible point de fusion des cendres et de combustibles très secs, un refroidissement de la grille (par eau ou par air) est souvent nécessaire. La recirculation des gaz de combustion est un autre moyen de contrôler la température de la chambre de combustion ou la température du lit de combustion sur la grille. Afin d'éviter la formation de scories dans le lit de combustion, il convient d'envisager l'utilisation d'une recirculation primaire des gaz de combustion. Une partie du flux de gaz d'échappement riche en $CO_2$ et pauvre en oxygène est alors acheminée vers le lit de combustible avec l'air de combustion. Le rapport de mélange est déterminé par le rapport d'air de combustion sous-stœchiométrique souhaité (manque d'air). La surchauffe dans la chambre de combustion, qui provoque la formation de scories et une usure importante du revêtement de la chambre de combustion, peut être évitée grâce à une recirculation secondaire des gaz d'échappement. Une partie du flux de gaz d'échappement riche en $CO_2$ et pauvre en oxygène est alors acheminée séparément ou avec l'air secondaire dans la chambre de combustion. La température du lit de combustion ou de la zone de combustion peut ainsi être réduite jusqu'à 200 K, ce qui diminue les coûts d'entretien et de maintenance.

### 5.3.3 Combustion en lit fluidisé

Dans un foyer à lit fluidisé, il n'y a pas de lit de combustion fixe. Le combustible est mis en suspension avec le matériau chaud du lit, une matière inerte granuleuse, généralement du sable et des cendres, par un flux rapide d'air primaire (contenant généralement une partie de gaz de recirculation). Les particules se trouvent ainsi dans un état fluidisé. Le matériau du lit assure la fonction de transfert de chaleur. Il absorbe la chaleur de combustion libérée et la restitue dans l'ensemble du lit fluidisé. Le bon mélange et la répartition très homogène de la température créent des conditions favorables à la conversion thermique du combustible. Les vitesses élevées de l'air entraînent une chute de pression plus importante dans le lit fluidisé, ce qui nécessite des ventilateurs plus puissants (environ 100 mbar de plus par rapport aux foyers à grille). Lors du démarrage du foyer, le matériau du lit doit d'abord être chauffé à environ 600 °C à l'aide d'un brûleur de démarrage fonctionnant généralement au gaz ou au fioul avant que le combustible puisse être introduit dans la chambre de combustion.

Les foyers à lit fluidisé conviennent aux combustibles présentant différentes teneurs en eau et en cendres. La température de combustion doit être maintenue en dessous de la température de ramollissement des cendres dépendant du combustible, car plus la température augmente, plus le lit de combustion a tendance à former des scories, à se corroder et à s'agglomérer. Pour séparer le soufre et le chlore, il convient d'ajouter des additifs (par exemple du calcaire) directement dans la chambre de combustion. Cela permet d'éviter le rejet de polluants tels que les $SO_x$ et les composés halogénés sans avoir recours à des équipements coûteux. En raison des températures de combustion relativement basses, pratiquement aucun $NO_x$ thermique n'est formé. La formation de $NO_x$ à partir de l'azote contenu dans le combustible peut être contrôlée par un faible excès d'air (étagement de l'air) [50]. Les foyers à lit fluidisé sont donc bien adaptés à l'utilisation énergétique des résidus biogènes.

On distingue les fours à lit fluidisé stationnaires et les fours à lit fluidisé circulant. À des vitesses de gaz de 1 à 2 m/s, le matériau du lit forme un **lit fluidisé stationnaire**. Au-dessus de cette couche, le combustible est introduit dans la chambre de combustion, tombe sur le lit fluidisé et s'y dégazéifie. Une oxydation complète des gaz combustibles libérés a lieu dans l'espace libre au-dessus, avec ajout d'air secondaire. Aucun traitement particulier du combustible n'est nécessaire, une granulométrie < 10 mm étant suffisante. En raison des dimensions du lit, cette technologie convient aux installations d'une puissance maximale d'environ 80 MW. À des vitesses de gaz plus élevées (5 à 10 m/s), le matériau du lit est de plus en plus évacué du lit fluidisé. Après être sorti de la chambre de combustion, il est à nouveau séparé et renvoyé (**lit fluidisé circulant**, Figure 5). Par rapport au lit fluidisé stationnaire, cette technologie présente l'avantage de mélanger plus intensément les solides lors de l'ajout d'additifs, ce qui réduit la consommation d'additifs.

Pour des raisons économiques, le lit fluidisé circulant n'est utilisé qu'à partir d'une taille d'installation d'environ 15 MW.

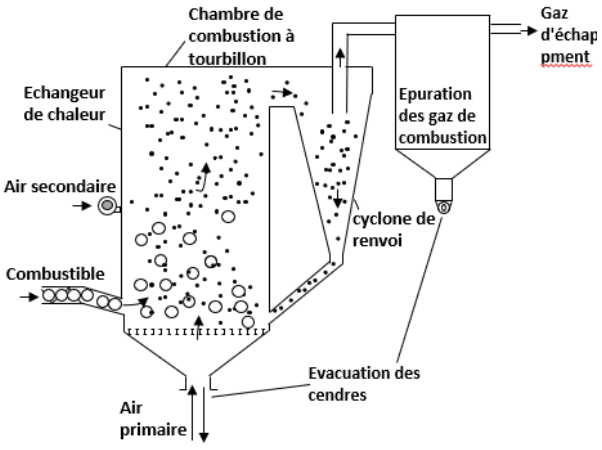



Figure 5.8 Principe de fonctionnement d'une combustion à lit fluidisé circulant.

### 5.3.4 Combustion de poussières

Les combustibles dont la teneur en poussière est supérieure à 50 %, comme ceux généralement utilisés dans l'industrie de transformation du bois, ne sont plus adaptés à une utilisation dans un foyer à poussée inférieure ou à grille. Cela nécessiterait un traitement par briquetage ou pelletisation (chapitre 4.5). Le combustible peut également être utilisé directement dans une combustion de poussières. Cette technologie de combustion peut être combinée avec d'autres (par exemple une combustion à grille ou à lit fluidisé) et permet une gradation du combustible (chapitre 5.7).

Dans les foyers à injection ou à poussière, le combustible pulvérulent (taille maximale des particules: 10 à 20 mm, teneur en eau < 20 %) est introduit pneumatiquement dans la chambre de combustion. L'air vecteur agit alors comme air primaire. Les particules de combustible commencent à se dégazer immédiatement après leur entrée dans le foyer. La combustion des composants volatils s'effectue par ajout d'air secondaire et tertiaire.

Une combustion de poussière est souvent réalisée sous la forme d'un brûleur à tourbillon (Figure 5.). Les jets d'air primaire, secondaire et tertiaire sont alors injectés de manière concentrique dans la chambre de combustion par des buses annulaires. Le flux d'air primaire et la buse à combustible se trouvent au centre de la flamme; c'est là que se forme une zone de combustion primaire. Vers l'extérieur, une stratification de l'air est obtenue grâce à des flux d'air secondaire et tertiaire plus rapides qui aspirent les gaz d'échappement et les oxydent au fur et à mesure (Figure 5.).

Grâce au bon mélange du combustible et de l'air ainsi qu'à la petite taille des particules de combustible, on obtient une qualité de combustion élevée avec de faibles émissions de CO (combustion complète). L'alimentation en combustible est réglable en continu jusqu'à une charge partielle d'environ 25 % de la charge nominale sans influence notable sur les propriétés de combustion. Un autre avantage de cette technologie réside dans les faibles valeurs de $NO_x$ grâce à la stratification de l'air et aux excédents d'air généralement faibles requis. En raison de la température de combustion élevée et donc de la densité énergétique élevée sur les parois de la chambre de combustion, il convient de prévoir un refroidissement par eau ou par recirculation des gaz d'échappement. Une charge thermique élevée et l'érosion peuvent entraîner une usure rapide de la chamotte ([51],[52]).

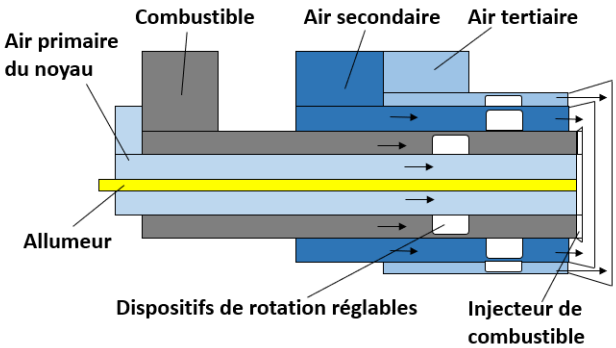



Figure 5.9 Coupe transversale d'un brûleur à tourbillon.

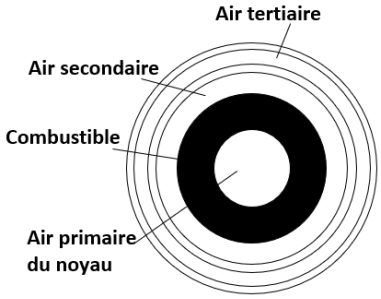



Figure 5.10 Principe de la stratification de l'air à l'intérieur de la flamme d'un brûleur à flamme tourbillonnaire (vue de face des buses d'air et de combustible).

## 5.4 Transfert de chaleur dans la partie chaudière

La chaleur libérée dans la chambre de combustion est transférée par les gaz d'échappement chauds à un fluide caloporteur en circulation, généralement de l'eau liquide ou sous forme de vapeur, dans les installations de cogénération ou, pour la chaleur industrielle, également de l'huile thermique, via un échangeur de chaleur (également appelé « échangeur thermique » dans le langage courant). Un transfert de chaleur élevé est déterminant pour obtenir un rendement élevé de la chaudière (chapitre 20.11) et donc un fonctionnement efficace. Pour garantir cela, les surfaces des échangeurs de chaleur doivent être nettoyées à intervalles réguliers afin d'éliminer les dépôts liés au fonctionnement (voir chapitre 5.5).

En fonction des exigences respectives, différents types de construction, principes de fonctionnement (à courant parallèle, à contre-courant ou à courant croisé) et montages (horizontaux ou verticaux) sont utilisés. Dans le cas des chaudières à biomasse, les chaudières à tubes de fumée ou à tubes d'échappement (flux d'échappement côté tubes) et les chaudières à tubes d'eau (flux d'échappement côté enveloppe) sont largement répandues. Si le fluide caloporteur se trouve à l'intérieur du tube échangeur de chaleur qui est en contact avec les gaz d'échappement chauds à l'extérieur, on parle alors de chaudière à tubes d'eau. La chaudière à tubes d'eau est le type de construction le plus répandu pour la production de vapeur. Dans la chaudière à tubes de fumée, les gaz d'échappement chauds sont acheminés à travers des tubes qui sont baignés à l'extérieur par le fluide caloporteur. Ce type de construction est également appelé chaudière à grande chambre d'eau lorsque l'eau est utilisée comme fluide caloporteur et est principalement utilisé pour les installations de production d'eau chaude. Les tubes de fumée contiennent généralement des turbulateurs. Ces composants en forme de spirale font tourbillonner les gaz d'échappement qui les traversent et améliorent ainsi le transfert de chaleur vers le tube échangeur de chaleur. Les turbulateurs servent également de dispositif de nettoyage (chapitre 5.5).

Lorsque la température des gaz de combustion est inférieure au point de rosée, il se produit une condensation

de composants gazeux potentiellement corrosifs. La teneur en eau, en soufre et en chlore du combustible joue ici un rôle important. Indépendamment de la teneur en soufre ou en chlore, la pression partielle de vapeur d'eau et donc le point de rosée dans les gaz de combustion augmentent avec la teneur en eau du combustible. Le point de rosée acide dans les gaz d'échappement augmente à la fois avec la teneur en soufre et en chlore et avec la proportion de vapeur d'eau, en fonction de la teneur en eau du combustible et de l'excès d'air. Dans le cas des combustibles à teneur élevée en soufre ou en chlore (par exemple, bois usagé, bois provenant de l'entretien du paysage, en particulier des talus routiers, résidus de bois provenant de la transformation du bois), le point de rosée acide augmente nettement au-dessus de celui de la vapeur d'eau, passant de > 100 °C à 200 °C [53].

Si les gaz d'échappement sont refroidis en dessous des points de rosée acides respectifs, il se forme de l'acide sulfurique ou chlorhydrique, responsables de dommages dus à la corrosion (corrosion de surface, corrosion par piqûres). Cependant, ce n'est pas seulement la température des gaz d'échappement qui est déterminante pour éviter les problèmes de corrosion, mais aussi la température des surfaces avec lesquelles les gaz d'échappement entrent en contact. Afin de minimiser les problèmes de corrosion sur les surfaces des échangeurs de chaleur dans la chaudière, les fabricants de chaudières prescrivent une température minimale d'entrée de l'eau dans la chaudière. Plus la teneur en eau est élevée, plus la température minimale d'entrée doit être élevée. La température minimale de retour de la chaudière est garantie par un mélange approprié du départ et du retour (maintien du retour, élévation du retour) via un circuit de mélange hydraulique dans le circuit de la chaudière (vanne à 3 voies régulée) (voir chapitre 7.2). Dans le même temps, les débits minimaux et maximaux spécifiés par le fabricant de la chaudière doivent être respectés afin de garantir un débit complet et régulier et d'éviter toute surchauffe locale.

Dans les installations qui utilisent des assortiments de combustibles présentant des teneurs critiques en soufre et en chlore, il peut être nécessaire d'augmenter la température d'entrée de la chaudière en fonction de la teneur en soufre, chlore et en eau dans le combustible à une valeur comprise entre > 80 °C et 110 °C afin que les gaz de combustion ne refroidissent pas localement en dessous du point de rosée acide dans la partie de la chaudière et que des dommages dus à la corrosion puissent ainsi être évités. Dans les composants de l'installation dont les températures de surface sont inférieures aux températures du point de rosée acide des gaz d'échappement (par exemple, l'économiseur), les surfaces exposées aux gaz d'échappement doivent être réalisées dans un matériau résistant à la corrosion (acier inoxydable). Les surfaces refroidies des électrodes de séparation (plaques ou tubes internes) des séparateurs électrostatiques sont également sensibles à la corrosion lorsque la chaudière à bois fonctionne à faible charge.

Les installations de production de chaleur ou les chaudières sont des composants d'installations importants pour la sécurité et doivent disposer d'une autorisation officielle, des homologations de type, certifications et certificats de réception correspondants et être équipées des dispositifs de sécurité appropriés (par exemple, limiteur de température de sécurité, limiteur de pression de sécurité, sécurité thermique de vidange, soupape de sécurité, dispositifs permettant un fonctionnement sans surveillance permanente, alimentation électrique de secours, etc.). Il faut garantir que, dans toutes les conditions de fonctionnement et même en cas de panne de courant, une augmentation inadmissible de la température ou de la pression dans la chaudière ou dans le système hydraulique de production de chaleur soit empêchée. À cet effet, il est fait explicitement référence aux dispositions légales nationales en vigueur à respecter (voir également le chapitre 19).

Lors de l'installation de la partie chaudière, il convient de veiller à ce que les dispositifs de commande soient accessibles et à ce que l'espace nécessaire à la commande et en particulier à la maintenance (nettoyage) soit disponible.

## 5.5 Nettoyage automatique des tubes de chaudière

Pendant le fonctionnement, les tubes de chaudière en contact avec les gaz d'échappement chauds s'encrassent. Plus l'encrassement de l'échangeur de chaleur augmente, plus le transfert de chaleur diminue et plus la température des gaz d'échappement augmente, ce qui a un impact négatif sur l'efficacité de l'installation. Un nettoyage régulier des tubes de chaudière permet d'éviter ce phénomène. Les systèmes de nettoyage automatiques éliminent les dépôts, p. ex. par des impulsions d'air comprimé ou des procédés mécaniques, voire par un nettoyage par projection d'ondes de pression. Le nettoyage par projection n'est toutefois utilisé que pour les exigences spécifiques à l'installation dans la plage de puissance élevée.

Dans les petites installations de combustion, les conduites de fumée peuvent être nettoyés manuellement à l'aide de brosses par les portes ouvertes de la chambre de retournement, si la construction le permet. Une autre possibilité pour éliminer les dépôts sur les parois intérieures des tubes de chaudière consiste à déplacer les spirales en acier (turbulateurs) dans les tubes de chaudière (à la main ou électriquement).

Pour les installations de combustion > 200 kW avec un nombre élevé d'heures de fonctionnement à pleine charge, on utilise un nettoyage pneumatique par coups de bélier (voir Figure 5.1). À intervalles réguliers, les dépôts sur l'échangeur de chaleur sont éliminés par des impulsions d'air comprimé. Cela permet d'augmenter le rendement annuel de l'installation de combustion d'environ 3 à 4 %. L'effort de nettoyage est nettement moindre par rapport au nettoyage manuel. La durée de fonctionnement avant qu'un nouveau nettoyage manuel ne soit nécessaire (temps de déplacement) peut être augmentée à > 2’500 heures de fonctionnement à pleine charge.



Figure 5.1 Nettoyage automatique des tubes de chaudière (source : Schmid energy solutions).

## 5.6 Origine des émissions

La conception et la régulation du système de combustion jouent un rôle décisif pour garantir une combustion aussi peu polluante que possible. L'objectif est d'obtenir **une combustion** aussi **complète** que possible du combustible utilisé. Le carbone contenu dans le combustible est oxydé par l'oxygène de l'air alimenté. Les principaux produits de cette réaction sont le dioxyde de carbone ($CO_2$) et la vapeur d'eau ($H_2O$) (Tableau 5.2).

La combustion complète génère des oxydes d'azote ($NO_x$, principalement du NO et du $NO_2$ dans les processus de combustion techniques). Ceux-ci ont un effet irritant sur les voies respiratoires. Ils favorisent en outre l'acidification de l'écosystème ainsi que la formation d'ozone troposphérique et de particules fines secondaires. On distingue généralement trois voies de formation du $NO_x$. Le $NO_x$ thermique se forme à des températures supérieures à 1300 °C par réaction de l'oxygène atmosphérique avec l'azote atmosphérique. Le $NO_x$ prompt se forme en quantités relativement faibles, principalement lors de la combustion de combustibles fossiles en présence de radicaux hydrocarbonés. Sa formation augmente avec la température. La plage de température habituelle pour la combustion de la biomasse se situe entre 800 °C et 1200 °C. En raison de ces basses températures, le $NO_x$ issu de la combustion du bois est pratiquement exclusivement formé à partir des composés azotés contenus dans le combustible. La formation de $NO_x$ peut être considérablement réduite en optimisant la géométrie de la chambre de combustion et la régulation (dosage du combustible et de l'air) (chapitre 5.3).

Tableau 5.2 Produits issus de la combustion de la biomasse.

| Mécanisme de formation / Source | Produit |
|---|---|
| Combustion complète | $CO_2$, $H_2O$ |
| Combustion incomplète | CO, suie, $C_x$ $H_y$ imbrûlés |
| Sous-produits de la combustion complète | $NO_x$ |
| Impuretés du combustible | $SO_2$, $SO_3$, $H_2$ S, $NO_x$, cendres et oligo-éléments |

Une **combustion incomplète** entraîne des émissions de monoxyde de carbone (CO), d'hydrocarbures imbrûlés ($C_xH_y$), d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), de goudron, de suie, d'ammoniac ($NH_3$) et de protoxyde d'azote ($N_2O$). Les émissions sous forme de poussières sont classées en deux fractions en fonction de leur granulométrie : les cendres volantes grossières (> 1,0 µm) désignent les particules entraînées hors du lit de combustion. Les particules fines (0,01 à 1,0 µm) proviennent principalement des composants inorganiques du combustible qui s'évaporent pendant la combustion. Lorsque les gaz de combustion refroidissent, elles se condensent à nouveau et forment des sels. Cela produit des particules d'une taille d'environ 0,1 µm. Dans le cas du bois naturel contenant peu d'écorce, cela produit principalement des composés de potassium (p.ex. le sulfate de potassium $K_2SO_4$). Lorsque des composants inorganiques du combustible pénètrent directement dans le flux des gaz d'échappement sous forme de composants solides, ils agissent comme des germes de cristallisation pendant le refroidissement et peuvent se développer. Il en résulte des particules d'une taille d'environ 1 µm. Il s'agit là aussi de sels, mais principalement de composés de calcium (p. ex. oxyde de calcium CaO). Ce processus de formation est particulièrement important pour les combustibles à forte teneur en écorce (teneur en Ca plus élevée). La formation d'émissions de poussières à partir de particules de carbone est généralement d'importance mineure lorsque la température de combustion dépasse 600 °C et qu'une combustion complète est obtenue.

D'autres émissions pertinentes concernent les composés soufrés (dioxyde de soufre $SO_2$, trioxyde de soufre $SO_3$, hydrogène sulfuré $H_2S$), l'acide chlorhydrique (HCl) ainsi que les dioxines et les furanes (PCDD/F). En raison de la faible teneur en soufre et en chlore du bois naturel et du taux d'incorporation relativement élevé de chlore et de soufre dans les cendres, les émissions de $SO_2$ et de HCl sont généralement faibles. Les dioxines et les furanes se forment dans une plage de température comprise entre 200 °C et 500 °C à la surface des particules de cendres volantes non brûlées (synthèse de novo). Lors de la combustion de bois naturel dans des installations à la pointe de la technologie, les émissions de PCDD/F ne posent généralement pas de problème. Elles peuvent être considérablement réduites par une combustion complète, la réduction de la remise en suspension des particules du lit de braises et un dépoussiérage efficace. Il convient toutefois d'éviter un temps de séjour prolongé dans la plage de température de la synthèse *de novo* (càd à partir de précurseurs simples).

Pendant la combustion, des composants inorganiques et donc aussi des oligo-éléments (par exemple des métaux lourds) sont libérés de la matrice du combustible. Tant pendant la combustion que sur le trajet des gaz d'échappement vers la cheminée, les éléments se comportent différemment, les différents oligo-éléments présentant une volatilité variable. Leur température d'évaporation individuelle fait qu'ils s'évaporent et se recondensent à différents stades du processus. Les éléments à point d'ébullition élevé (Al, Cr, Fe, Mn, Si) sont peu volatils et restent donc en grande partie dans les cendres de grille. Si le point d'ébullition est légèrement inférieur (As, Pb,

Cd, Zn), les éléments s'évaporent au cours de la combustion et se condensent, absorbent ou adsorbent lors du refroidissement des gaz d'échappement sur des cendres volantes grossières ou fines et sont ainsi séparés des gaz d'échappement. Les éléments qui réagissent avec l'oxygène ou qui ont un point d'ébullition très bas passent d'abord dans les gaz d'échappement (N, S, Hg). Ils sont traités séparément lors de l'épuration des gaz d'échappement (dénitrification, désulfuration ciblées) (Figure 5.2).

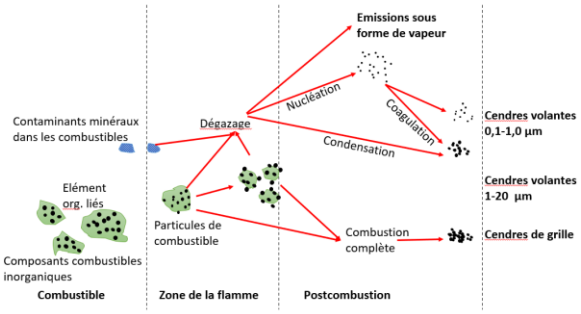



Figure 5.2 Comportement des oligo-éléments dans le combustible pendant et après la combustion.

## 5.7 Mesures primaires de réduction des émissions

Les mesures primaires visant à réduire les émissions des installations de combustion comprennent à la fois des mesures constructives et une gestion appropriée des paramètres de fonctionnement. L'optimisation des étapes du processus de combustion mentionnées ci-dessus permet de réduire considérablement les émissions résultant d'une combustion incomplète. Dans ce contexte, il est essentiel de disposer d'un lit de combustion stable et élevé, tout en assurant un bon mélange du combustible et de l'air et une durée de séjour suffisamment longue des gaz de combustion dans des plages de température élevées (> 850 °C). Le rapport entre l'air fourni et l'air nécessaire (indice d'excès d'air λ) joue ici un rôle essentiel. En théorie, un indice d'excès d'air λ = 1 serait optimal pour obtenir une combustion (stœchiométrique) complète. Dans la pratique, on travaille avec un indice d'excès d'air total de 1,3 à 1,8 pour les grandes installations et de 1,5 à 2,0 pour les installations petites et moyennes, car cela permet un mélange optimal du combustible, des gaz d'échappement et de l'air alimenté. Un excès d'air λ < 1 entraîne une combustion incomplète et seule une partie de l'énergie stockée dans le combustible est libérée sous forme d'énergie thermique. Si trop d'air est introduit dans le processus de combustion (λ >> 1), il se produit un refroidissement qui entraîne une combustion incomplète. L'optimisation du coefficient d'excès d'air peut être réalisée par une séparation géométrique du foyer en une zone de combustion primaire et une zone de combustion secondaire. Dans la zone de combustion primaire, le séchage et la pyrolyse/dégazage du combustible ont lieu dans des conditions sous-stœchiométriques (λ < 1), ainsi que l'oxydation du charbon de bois. Dans la zone de combustion secondaire, l'oxydation complète des gaz combustibles a lieu grâce à l'apport d'air secondaire (λ > 1) [54]. Dans les systèmes de combustion modernes dotés de bons systèmes de régulation, la concentration des composants imbrûlés des gaz d'échappement peut être réduite de manière très efficace. La recirculation primaire et secondaire des gaz d'échappement (voir chapitre 5.3.2) est également utilisée pour optimiser les conditions de combustion et comme mesure primaire de réduction des émissions.

Une alimentation en air adaptée à l'installation est également très importante pour réduire les émissions de poussières provenant des foyers à lit fixe. Le lit de combustion doit être aussi calme et stable que possible et être traversé de manière uniforme par l'air primaire afin qu'aucune particule ne soit soulevée et entraînée. Cela entraîne toutefois un faible mélange des gaz combustibles et de l'air dans la zone de combustion primaire. C'est pourquoi, dans la zone de combustion secondaire, l'accent est mis sur un bon mélange afin de maintenir l'excès d'air total nécessaire à un niveau faible et d'augmenter le rendement de l'installation. Cela peut être réalisé grâce à des sections de canal étroites dans lesquelles le gaz combustible atteint une vitesse élevée. L'air secondaire est également introduit à grande vitesse par des buses disposées en quinconce. D'autres possibilités sont une chambre de combustion secondaire de type tourbillon ou cyclone. Dans l'ensemble, il faut viser un excès d'air global faible, mais suffisamment élevé pour permettre une combustion complète.

Les mesures primaires de réduction des oxydes d'azote comprennent les procédés de stratification de l'air et de stratification du combustible ([55] ,[56] ,[57] ,[58]) (Figure 5.3). Dans les deux procédés, une zone de réduction est créée dans laquelle les composés azotés formés lors de la décomposition du combustible réagissent entre eux en l'absence d'oxygène pour former de l'azote moléculaire stable et inoffensif, par exemple selon la réaction suivante :

$$NH_2 + NO \rightarrow N_2 + H_2O.$$

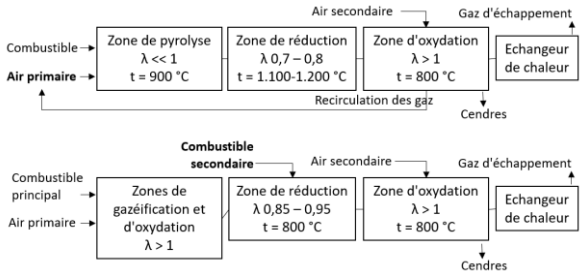



Figure 5.3 Principe de la stratification de l'air (en haut) et de la stratification du combustible (en bas) pour la réduction des NOx.

Ces deux procédés ne peuvent pas être installés a posteriori. La stratification de l'air est utilisée pour les nouvelles installations > 200 kW. La stratification du combustible peut également être utilisée pour les installations plus grandes. Ces procédés permettent une réduction des $NO_x$ d'environ 30 à 50 % pour les combustibles

à faible teneur en azote et de 50 à 70 % pour les combustibles à teneur en azote plus élevée ([55] ,[56]). Le potentiel de réduction d'un étagement du combustible est légèrement supérieur pour une plage de fonctionnement un peu plus large de la puissance de combustion [57].

Une réduction efficace des composés azotés en $N_2$ par étagement de l'air nécessite un temps de séjour suffisant des gaz combustibles dans la zone de réduction (au moins 0,3 s, λ = 0,7 - 0,8) à des températures élevées (1'100 °C à 1'200 °C) ([55] ,[57]). Pour y parvenir, la technique de l'installation doit être conçue pour une combustion étagée et tous les paramètres d'exploitation doivent être réglés avec précision. Afin d'empêcher le mélange de l'air secondaire dans la zone de combustion primaire, une séparation constructive des zones de combustion primaire et secondaire est nécessaire. L'utilisation de combustibles riches en cendres ou formant des scories est critique en raison des températures élevées. En comparaison, la combustion étagée nécessite un respect un peu moins strict des conditions de réaction. Dans ce cas, un combustible secondaire est ajouté dans une deuxième chambre de combustion, où il se mélange rapidement et facilement aux gaz de combustion chauds (environ 800 °C). La sciure de bois, par exemple, est un combustible approprié. À partir d'un léger déficit en air primaire (λ = 0.85 à 0.95), le combustible supplémentaire crée des conditions réductrices. Dans les deux cas, la combustion complète des gaz de combustion a lieu dans une zone d'oxydation en aval avec un excès d'air.

## 5.8 Mesures secondaires de réduction des émissions

### 5.8.1 Dépoussiérage

**Les cyclones** sont utilisés pour séparer les poussières grossières. En cas de débits volumétriques importants, on utilise un **multicyclone**. Un multicyclone est un montage en parallèle de plusieurs cyclones individuels regroupés dans un boîtier. Un cyclone est un séparateur centrifuge. Le gaz chargé de particules s'écoule soit tangentiellement (Figure 5.4) soit axialement (Figure 5.5) dans l'espace cylindrique du cyclone, où il est soumis à un courant de rotation. Les particules de cendres sont alors projetées hors du courant vers la paroi de l'enveloppe du cyclone, d'où elles sont séparées vers le bas en direction de l'évacuation des poussières. Le gaz épuré quitte le cyclone par un tube plongeur.

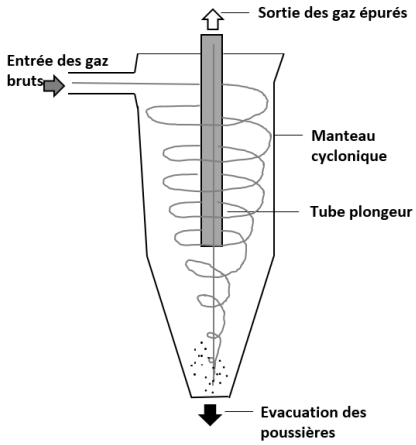



Figure 5.4 Coupe transversale d'un cyclone simple (séparateur tangentiel).

L'effet de séparation des cyclones dans les installations de combustion du bois se limite aux particules de cendres grossières > 10 µm. En règle générale, on obtient des valeurs de gaz épuré de 120 à 200 mg/m³ (pour 11 % en volume d'$O_2$) [59]. L'efficacité de séparation dépend de la vitesse circonférentielle du flux de rotation et de la conception géométrique du cyclone. Plus la vitesse circonférentielle est élevée, plus les particules pouvant être séparées sont petites. Cependant, la perte de pression augmente également avec la vitesse. En revanche, lorsque la puissance de combustion est réduite, l'efficacité de séparation diminue en raison de la vitesse réduite des gaz d'échappement. De plus, les particules > 10 µm ne peuvent pas toujours être séparées de manière fiable si elles ont une très faible densité et que la force centrifuge est donc trop faible.

En raison de son encombrement relativement faible et de ses coûts d'investissement et d'exploitation réduits, le cyclone est le procédé de dépoussiérage le plus couramment utilisé dans les installations de chauffage au bois. Cependant, son utilisation seule ne suffit généralement pas pour respecter la valeur limite de poussière. C'est pourquoi les cyclones sont utilisés pour la pré-séparation des grosses particules de poussière avant les procédés de séparation en aval. Cela réduit la charge de poussière dans les unités de filtration en aval, qui peuvent ainsi fonctionner plus efficacement. Dans le cas des procédés de séparation humides, les coûts liés à la gestion des boues et à leur élimination peuvent être réduits.

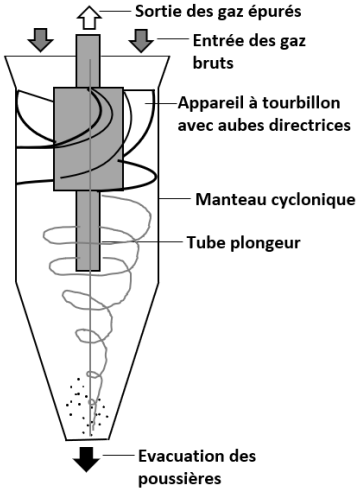



Figure 5.5 Coupe transversale d'un cyclone simple (séparateur axial).

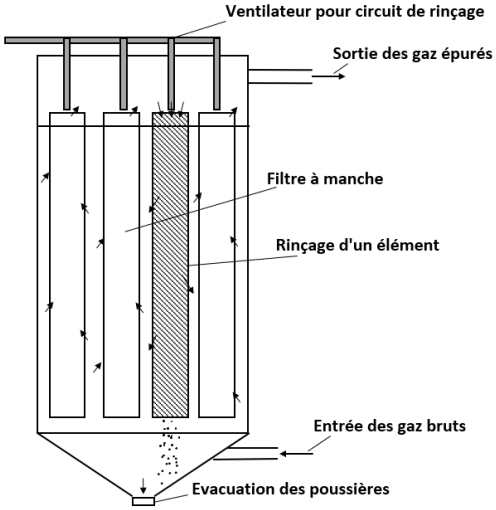



Figure 5.6 Schéma d'un filtre en tissu : disposition parallèle des éléments du filtre à manches. Trois éléments sont en position de travail, le quatrième élément est nettoyé selon le principe du contre-courant (nettoyage à l'air comprimé).

Dans un **filtre en tissu**, le gaz brut chargé de poussières est aspiré de l'extérieur à travers un média filtrant, qui est généralement appliqué sur un tissu de support cylindrique. Un gâteau de filtration se forme sur le média filtrant, qui est nettoyé périodiquement à contre-courant du flux de gaz d'échappement par de courtes impulsions d'air comprimé (Figure 5.6, Figure 5.7).

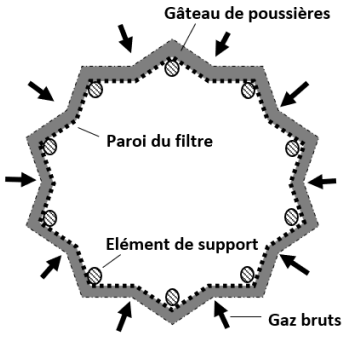



Figure 5.7 Coupe transversale d'un manchon filtrant.

Les médias filtrants courants sont des feutres aiguilletés qui sont traités en surface en fonction de la composition chimique et de la température des gaz d'échappement (par exemple, téflon, laminé PTFE). La température des gaz d'échappement est un facteur important pour le fonctionnement, car la condensation des gaz d'échappement peut entraîner un colmatage du filtre et un remplacement prématuré du média filtrant. La plage de fonctionnement est comprise entre 180 et 220 °C (température maximale des gaz d'échappement d'environ 250 °C, température minimale des gaz d'échappement avec un combustible sec à partir de 140 °C). Une teneur élevée en vapeur d'eau dans les gaz d'échappement (par exemple avec un combustible humide ou en fonctionnement partiel/à faible charge) est critique. De plus, une séparation des étincelles et des particules incandescentes est nécessaire. Les filtres en tissu, dont l'investissement est moyen mais dont les coûts d'exploitation sont relativement élevés, sont utilisés dans la plage de puissance > 100 kW. Les unités de filtration compactes ont un faible encombrement. Les filtres en tissu ont une grande efficacité de séparation. Il est possible d'atteindre des concentrations de gaz épurés de 1 à 5 mg/m³ (à 11 % vol. $O_2$ ) [59]. Les fuites telles que les microfissures ou les trous dans le tissu réduisent considérablement l'efficacité de la séparation. L'ajout d'absorbants (additifs) permet de réduire davantage les émissions de HCl, de $SO_x$ et de dioxines (PCDD/F).

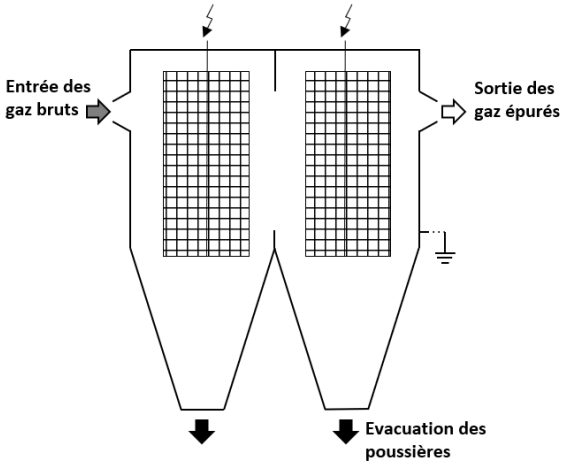



Figure 5.8 Schéma d'un électrofiltre.

Dans un **séparateur** électrique, la séparation des particules s'effectue grâce à un champ électrique. Dans le

langage courant, on utilise également le terme « électrofiltre », mais comme la séparation ne s'effectue pas par filtration, nous utiliserons ci-après le terme « séparateur électrique » (Figure 5.8). Un séparateur électrique se compose d'une électrode de pulvérisation reliée à une source de tension et d'une électrode de précipitation mise à la terre. Les molécules de gaz sont ionisées par un courant d'électrons et adhèrent aux particules contenues dans le gaz brut. Les particules ainsi chargées se déposent sur l'électrode de précipitation où elles sont séparées (Figure 5.9). Les électrofiltres peuvent également être utilisés à faible puissance. Leur efficacité de séparation est élevée, avec des teneurs en gaz pur de 5 à 50 mg/m³ (pour 11 % en volume d'$O_2$), mais ils nécessitent beaucoup d'espace, représentent un investissement important et ont des coûts d'exploitation moyens.

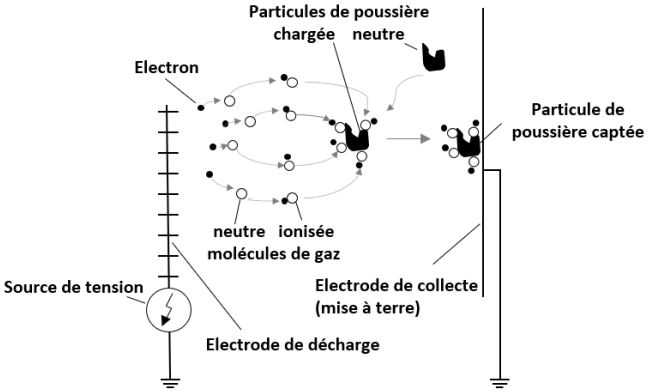



Figure 5.9 Principe physique de fonctionnement d'un électro-séparateur.

Les électrofiltres à sec sont les plus couramment utilisés. Ils sont généralement conçus sous forme d'électrofiltres à plaques ou à tubes. Les électrofiltres à plaques, qui sont nettoyés périodiquement à l'aide de dispositifs de battage, sont aujourd'hui disponibles comme technologie établie à partir de 200 kW. Ils nécessitent beaucoup d'espace, leur hauteur correspondant à peu près à celle de la chaudière en amont. Il faut impérativement éviter que la température des gaz d'échappement descende en dessous du point de rosée tant que la haute tension est activée. Afin de réduire le risque de courts-circuits, les isolateurs sont en outre décalés par rapport au flux de gaz et souvent chauffés. Malgré ces mesures, la haute tension ne doit être activée que lorsque la température des gaz d'échappement a atteint 80 °C pour le bois naturel et 130 °C pour le bois usagé, par exemple. En dessous de cette valeur limite spécifiée par le fabricant, le séparateur électrique est inefficace. Lors du démarrage et du fonctionnement à charge minimale, il convient donc d'assurer un fonctionnement stationnaire le plus rapidement possible. À cette fin, un bypass côté gaz de combustion peut être utilisé pour augmenter rapidement la température des gaz de combustion dans le séparateur électrique. Sur les appareils de série, le séparateur électrique peut être intégré directement dans la chaudière. Les séparateurs électriques tubulaires sont proposés pour les installations de chauffage au bois jusqu'à environ 5'000 kW. Ils contiennent plusieurs tubes filtrants avec des électrodes de pulvérisation internes. Le nettoyage des parois intérieures des tubes (= électrode de précipitation) s'effectue par nettoyage mécanique à l'aide de brosses. Par rapport au séparateur électrique à plaques, l'encombrement est réduit, mais les mêmes exigences s'appliquent en matière de dépassement du point de rosée.

Il existe également **des séparateurs électriques humides** qui sont utilisés en combinaison avec une condensation des gaz d'échappement (voir chapitre 13.7.2.3). Pour que la vapeur d'eau contenue dans les gaz d'échappement se condense, une température de retour maximale < 45 °C est nécessaire (encore plus basse si le combustible est sec). Pendant la condensation de la vapeur d'eau, les particules de poussière chargées sont utilisées comme germes de condensation et, intégrées dans les gouttes d'eau, sont séparées sous forme de boues de condensation. Le degré de séparation est augmenté par la teneur en eau de condensation et les besoins en eau étrangère sont réduits au minimum. Il convient de tenir compte du traitement des boues et du post-traitement de l'eau.

Dans le cadre de la gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois, il convient en outre de fixer une **disponibilité minimale** annuelle pour la séparation des poussières et de contrôler son respect dans le cadre de l'optimisation de l'exploitation (étape 5). En effet, un séparateur électrique doit être actif pendant les phases où les émissions de poussières sont importantes (Figure 5.).

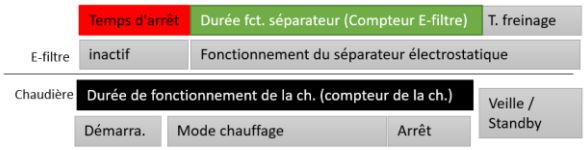



Figure 5.20 Cycle de fonctionnement type d'un foyer et d'un séparateur électrique (voir FAQ 38).

Le démarrage, le fonctionnement en mode chauffage et l'arrêt du foyer sont regroupés en une seule phase d'exploitation, qui correspond à la durée de fonctionnement du foyer. La durée de fonctionnement du séparateur ne peut être comptabilisée que si le séparateur électrique fonctionne en même temps que le foyer (vert). Si le séparateur électrique présente un retard à la mise en marche ou un dysfonctionnement, il en résulte un temps d'arrêt (rouge). Si le séparateur électrique fonctionne plus longtemps que le foyer, il s'agit d'un temps de fonctionnement résiduel qui ne doit pas être comptabilisé dans le temps de fonctionnement. Pendant l'arrêt/la mise en veille du foyer, les émissions de poussières sont nettement plus faibles que pendant le fonctionnement du foyer. Le temps de fonctionnement résiduel du séparateur électrique permet néanmoins de réduire encore les émissions de poussières. La disponibilité d'un électrofiltre est généralement déterminée sur une année et est définie comme le rapport entre le temps de fonctionnement cumulé de l'électrofiltre (en vert) et le temps de fonctionnement cumulé du foyer (en noir).

Tant pour les électrofiltres que pour les filtres à manches, la température minimale prescrite par le fabricant, qui dépend du combustible, doit être atteinte le plus rapidement possible au démarrage et il faut éviter que la température descende en dessous de cette valeur en fonc-

tionnement à charge minimale. La température maximale admissible à l'entrée du séparateur/filtre doit également être respectée. La configuration et le mode de fonctionnement de l'installation ont une grande influence à cet égard. Alors que les entreprises de transformation du bois et les installations d'incinération de bois usagé fonctionnent souvent en mode de charge continue, on trouve dans le domaine de l'approvisionnement en chaleur des bâtiments résidentiels des centrales de chauffage au bois mono ou bivalentes avec une part croissante de fonctionnement en charge faible.

**Remarques sur l'intégration et l'optimisation du fonctionnement** (voir également le chapitre 16 )

- Dans le cas d'installations équipées de deux chaudières à bois, la solution avec un seul séparateur de particules et une seule cheminée n'est pas judicieuse et n'est pas recommandée. Équiper chaque chaudière de son propre séparateur de particules et de sa propre cheminée est certes plus coûteux, mais présente des avantages grâce à des lignes de chaudières claires (aucune influence réciproque au niveau des gaz d'échappement, section transversale optimale de la cheminée, moins de problèmes en fonctionnement à charge partielle, etc.
- Lorsque la température des gaz de combustion est supérieure à 120 °C, il convient de vérifier si l'échangeur de chaleur des gaz de combustion (économiseur) doit être installé avant ou après le séparateur électrique ou le filtre en tissu. Lorsque la température des gaz de combustion est plus basse, l'échangeur de chaleur doit dans tous les cas être placé après le séparateur électrique afin d'éviter la condensation des composants des gaz de combustion dans le séparateur électrique.
- Il est important que les surfaces d'échange thermique d'un échangeur de chaleur à condensation soient toujours humides du côté des gaz d'échappement. C'est le seul moyen d'éviter les dépôts indésirables qui peuvent se former dans les zones passant de l'état humide à l'état sec.
- Le concept d'optimisation du fonctionnement doit toujours stipuler clairement que l'enregistrement automatique des données doit indiquer « séparateur de particules en fonction » (c'est-à-dire haute tension activée ou dérivation fermée ou injection d'eau de lavage activée) et non pas simplement un signal de validation.

## 5.8.2 Dénitrification

Pour les combustibles riches en azote tels que les déchets de bois, les résidus de panneaux de particules, le bois dur naturel ou le bois tendre à forte teneur en écorce, des mesures secondaires de réduction des $NO_x$ doivent être mises en œuvre afin de respecter les valeurs limites d'émission prescrites. Le domaine d'application est expliqué plus en détail au chapitre 13.9.2 . Les mesures de dénitrification sont difficiles, voire impossibles à mettre en place a posteriori. Leur utilisation doit donc être prise en compte dès le début lors du choix de la technologie de combustion et de la gamme de combustibles et, le cas échéant, être planifiée.

Dans **le procédé SNCR (réduction sélective non catalytique)**, un agent réducteur est injecté dans une zone de réduction directement dans la chambre de combustion. L'agent réducteur utilisé est une solution d'ammoniac ($NH_3$) ou d'urée ($NH_2$ $CONH_2$), qui n'est pas corrosive et donc plus facile à manipuler. À haute température, il se forme des radicaux $NH_2$ qui se réduisent avec le NO en azote élémentaire ($N_2$). Un bon mélange est nécessaire dans la zone de réaction. Il faut viser un temps de séjour d'environ 0,5 seconde dans une plage de température comprise entre 850 et 950 °C. Pour doser l'agent réducteur, il est nécessaire de mesurer le $NO_x$ dans les gaz d'échappement (rapport molaire n = $NH_3$ /$NO_x$ [mol/mol] = env. 2). Le taux moyen de dénitrification avec le procédé SNCR est de 50 à 75 %, mais il peut atteindre 95 % dans des conditions de réaction optimales [57] . Ce procédé est généralement utilisé dans les nouvelles installations, mais il peut également être installé a posteriori en fonction de l'espace disponible. Il est également possible de construire de nouvelles installations « prêtes pour le SNCR ». Dans ce cas, le système de combustion est déjà équipé des composants nécessaires au procédé SNCR (zone de réduction, ouvertures pour l'injection, espace réservé pour le réservoir d'agent réducteur, etc.). Si, après la mise en service, il s'avère qu'une dénitrification est nécessaire, une mise à niveau peut être effectuée rapidement.

Le procédé SNCR nécessite un contrôle précis des conditions de réaction. Il est particulièrement adapté au fonctionnement en charge continue et en combinaison avec un laveur humide. Une injection de l'agent réducteur en dehors de la plage de température susmentionnée favorise la formation de sous-produits azotés tels que l'ammoniac, le protoxyde d'azote ($N_2O$) ayant un impact sur le climat, l'acide cyanhydrique (HCN) et l'acide isocyanique (HNCO).

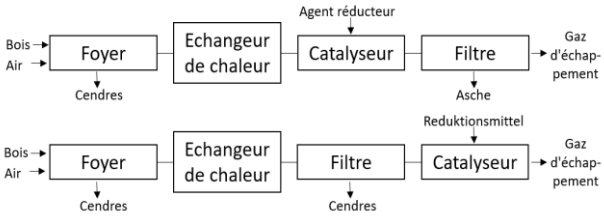



Figure 5. 10 Procédé de réduction catalytique sélective (SCR) à forte concentration de poussières (en haut) et à faible concentration de poussières (en bas).

Lorsque l'agent réducteur est utilisé en association avec un catalyseur, on parle de **SCR (réduction catalytique sélective)**. Le SCR permet d'atteindre un taux de dénitrification supérieur à 95 % avec un faible taux d'échappement d'ammoniac. Pour éliminer les dioxines éventuelles, il est recommandé d'utiliser un catalyseur d'oxydation intégré. Une mesure du $NO_x$ et un réglage précis du rapport molaire (n = $NH_3$/$NO_x$ [mol/mol] = env. 1) sont nécessaires. En ce qui concerne le mode de fonctionnement, on distingue le mode « high-dust » avec séparation des poussières en aval et le mode « low-dust » avec séparation des poussières en amont (Figure 5. 10). La plage de température est comprise entre 200 et 250 °C

pour le procédé « low-dust » et entre 250 et 450 °C pour le procédé « high-dust ». Dans ce cas, il est recommandé d'utiliser un économiseur en aval pour réduire la température des gaz d'échappement. Avec le procédé à faible dégagement de poussière, le catalyseur peut s'obstruer en raison des dépôts de poussière. Il n'est donc adapté que dans une certaine mesure aux résidus et aux déchets de bois. De plus, dans les deux cas, il est possible que des substances toxiques pour le catalyseur, telles que l'arsenic, le phosphore ou les métaux alcalins, désactivent le matériau catalytique [51]. Si les poisons du catalyseur sont séparés, par exemple avec de la poussière, avant même que les gaz d'échappement n'entrent dans le catalyseur, la tendance à l'empoisonnement est réduite et la durée de vie des éléments catalytiques est ainsi prolongée. Le procédé high-dust n'est pas recommandé par QM Chauffages au bois en raison des problèmes liés à l'encrassement et au colmatage.

## 5.9 Récupération de chaleur avec économiseur et condensation des gaz d'échappement

Le rendement de la production de chaleur peut être considérablement augmenté si les gaz d'échappement sont refroidis dans des échangeurs de chaleur supplémentaires après leur sortie de la chaudière (chapitre 13.7.2).

Un **économiseur** est un échangeur de chaleur supplémentaire destiné à préchauffer le retour du système. Les gaz d'échappement y sont refroidis à environ 75 à 80 °C (jusqu'à un peu plus que le point de rosée). Au démarrage de l'installation de chauffage ou lorsque la température dans la cheminée est inférieure à la température de consigne, une partie du flux de gaz d'échappement chauds est directement acheminée vers la cheminée via un clapet jusqu'à ce que la température de consigne soit à nouveau atteinte. En raison du potentiel d'amélioration de l'efficacité élevé, l'utilisation d'économiseurs doit être envisagée dans tous les cas lors de la conception d'une centrale de chauffage au bois. Par exemple, avec un indice d'excès d'air λ = 2, un refroidissement supplémentaire des gaz de combustion de 10 K entraîne une augmentation du rendement de combustion de l'ordre de 1 %[60] . En fonction de l'indice d'excès d'air et de la teneur en eau, il est possible d'obtenir une augmentation du rendement de 5 à 7 %. Afin de maintenir l'excès d'air nécessaire à un niveau faible (λ < 1,8), une bonne régulation de la combustion est nécessaire.

Une **installation de condensation des gaz d'échappement** comprend généralement trois étapes. Les gaz d'échappement qui quittent la chaudière passent d'abord par un économiseur, puis par un condenseur (avec un refroidisseur en amont) et, si nécessaire, par un préchauffeur d'air en aval (Figure 5. 11). Le domaine d'application concerne généralement les installations > 1 MW. En cas de coûts de combustible élevés et de longues durées de fonctionnement de l'installation (fonctionnement en charge continue), des installations plus petites d'environ 500 kW peuvent également être envisagées. La température moyenne de retour des consommateurs de chaleur doit être basse et inférieure d'au moins 10 °C au point de rosée des gaz d'échappement. Il convient de vérifier si un retour à basse température séparé est nécessaire pour le condenseur.

Dans le condenseur, les gaz d'échappement sont refroidis jusqu'à une température inférieure au point de rosée. Une partie de la vapeur d'eau contenue dans les gaz d'échappement se condense alors. Ce processus libère d'importantes quantités d'énergie sous forme de chaleur sensible, mais surtout latente. La teneur en eau du combustible joue un rôle important: plus la quantité d'eau entrant dans le processus avec le combustible est importante, plus la quantité de vapeur pouvant se condenser est élevée. Plus la température à laquelle les gaz d'échappement peuvent être refroidis est basse, plus l'installation de condensation des gaz d'échappement est efficace. Avec un faible excès d'air total dans la combustion, une teneur en eau élevée dans le combustible et une température de retour basse du circuit de chauffage (< 40 °C), le rendement de l'installation de combustion peut être augmenté jusqu'à 20 %. Dans la zone d'entrée du condenseur, il peut y avoir des endroits côté gaz d'échappement qui sont alternativement humides ou secs selon les conditions de fonctionnement. Ces endroits sont exposés à des risques de dépôts et de corrosion. Pour éviter ce type de problèmes, on installe souvent en amont un système de refroidissement rapide (trempe) qui humidifie les gaz de combustion et les refroidit jusqu'au point de rosée. Lorsque les gaz de combustion humidifiés atteignent le condenseur, ils sont encore une fois refroidis en dessous du point de rosée (condensation). Cela permet d'éviter la formation de zones sèches dans le condenseur.

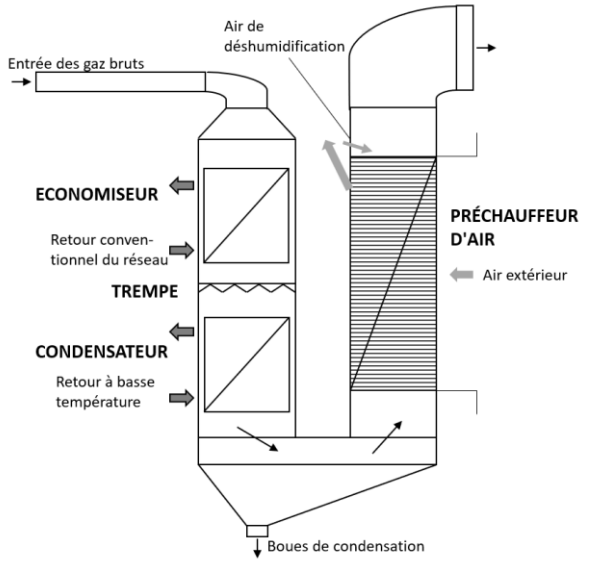



Figure 5. 11 Schéma d'une installation de condensation des gaz d'échappement.

En raison des métaux lourds qu'elles contiennent, les boues de condensat produites doivent être séparées de la phase liquide, le condensat, par exemple dans un bassin de sédimentation, puis mises en décharge ou traitées industriellement. Cette séparation doit être effectuée à un pH > 7.5 afin d'éviter l'élution des métaux lourds dans la phase liquide. En cas de combustion de haute qualité (CO

< 250 mg/m³ à 11 % vol. $O_2$) et après utilisation d'un étage de neutralisation (régulation du pH), le condensat excédentaire peut être rejeté dans les égouts après séparation des boues, dans le respect des réglementations locales.

En règle générale, les installations disposent au moins d'un **préchauffeur d'air** dans lequel les gaz d'échappement cèdent davantage de chaleur à l'air entrant. Cet air préchauffé est d'une part utilisée comme air de combustion et d'autre part ajouté aux gaz d'échappement refroidis afin de réduire la condensation dans les conduites en aval et dans la cheminée ainsi que la formation de panaches de vapeur d'eau au niveau de la cheminée. Une déshumidification complète n'est pas absolument nécessaire, car elle n'a pas d'autre utilité technique, mais seulement un effet optique. Elle peut être particulièrement importante pour les centrales de chauffage au bois situées dans des zones touristiques et à proximité des zones résidentielles.

Lors de l'intégration d'échangeurs de chaleur des gaz d'échappement, il convient de veiller à leur disposition correcte en relation avec les composants destinés à l'épuration des gaz d'échappement. Une installation de condensation des gaz d'échappement combinée à un séparateur électrique humide permet d'atteindre un taux de séparation des poussières, y compris des particules fines, d'environ 95 %. Si un électro-séparateur à sec ou un filtre en tissu est installé en amont de l'économiseur ou de l'installation de condensation des gaz d'échappement, l'encrassement de ces composants peut être considérablement réduit et l'élimination coûteuse des boues de condensation de l'électro-séparateur humide peut être évitée.

## 5.10 Technique de contrôle des processus

### 5.10.1 Principes de base

Le terme « technique de contrôle des processus » est utilisé dans différents domaines d'application. La technique de contrôle regroupe essentiellement l'ensemble de la technique de mesure, de commande et de régulation (technique MCR) et les flux de données associés d'une installation (pour plus de définitions, voir [61]). La technique de contrôle sert à automatiser le fonctionnement de l'installation et comprend toutes les tâches de commande, de régulation et de surveillance nécessaires à cet effet. L'intégration de systèmes MSR et de concepts de régulation adaptés est indispensable pour garantir un fonctionnement efficace, sûr et à faibles émissions de l'installation. Elle constitue donc un élément important de la planification et de la réalisation des centrales de chauffage au bois. Son importance dans le cadre de la gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois est donc également élevée. Ce sujet est traité en détail dans les schémas standard ([62]). À l'exception de quelques explications, les principes de base de la technique de mesure, de commande et de régulation ne sont pas abordés (voir p. ex. [63]), mais uniquement des thèmes spécifiques pertinents pour la planification, la construction et l'exploitation des centrales de chauffage au bois.

La technologie de contrôle des processus a considérablement évolué depuis la construction des premières centrales de chauffage au bois. Un équipement complet de mesure, de commande et de régulation, permettant un fonctionnement entièrement automatique de l'installation, est à la pointe de la technologie. Même les petites chaudières issues de la production en série sont aujourd'hui équipées d'un système de régulation entièrement automatique et d'une interface utilisateur numérique.

**Termes**

On entend par **régulation** un processus dans lequel une grandeur à régler (grandeur réglée) est mesurée en continu et comparée à une grandeur de référence (valeur de consigne). Le résultat de la comparaison influence la grandeur réglée de manière qu'elle s'aligne sur la grandeur de référence. Le processus qui en résulte se déroule dans un circuit de régulation fermé. En revanche, une **commande** représente une chaîne d'action ouverte (chaîne de commande) dans laquelle la grandeur à régler est influencée (commandée) en fonction de la grandeur d'influence la plus importante (grandeur perturbatrice) sans que la grandeur à régler soit mesurée. La valeur réelle atteinte par la grandeur à régler n'est donc pas vérifiée et n'a aucune influence sur la chaîne de commande (cf. [63]).

La tâche principale de **la technique de mesure** consiste à enregistrer quantitativement les processus techniques à l'aide d'appareils de mesure appropriés (capteurs) et à fournir, à partir des grandeurs mesurées, la base pour la commande et la régulation des processus (pour plus d'informations, voir [64]).

Selon la norme EN 61131 - partie 1 [65], un **automate programmable (API)** est un système électronique numérique destiné à être utilisé dans des environnements industriels, doté d'une mémoire programmable pour le stockage interne des instructions de commande orientées utilisateur afin de mettre en œuvre des fonctions spécifiques telles que la commande de liaison, la commande séquentielle, fonctions temporelles, de comptage et arithmétiques, afin de commander différents types de machines et de processus à l'aide de signaux d'entrée et de sortie numériques ou analogiques.

La technologie de contrôle des processus d'une centrale de chauffage au bois doit remplir les tâches fondamentales suivantes :

- Commande et régulation entièrement automatiques de l'ensemble de l'installation sans intervention manuelle régulière et, si possible, sans présence permanente du personnel d'exploitation
- Garantie d'un fonctionnement sûr de l'installation dans toutes les conditions d'exploitation (protection des personnes et de l'installation)
- Garantie de l'approvisionnement en chaleur des consommateurs
- Permettre un fonctionnement optimal de l'installation dans toutes les conditions d'exploitation.

- Commande et surveillance de l'installation (visualisation de l'installation/représentation de l'état de fonctionnement actuel, réglage des valeurs de consigne et des paramètres de régulation, mise en marche/arrêt des composants de l'installation, etc.
- Accès à distance et messages d'erreur
- Enregistrement, traitement et stockage permanent de toutes les données d'exploitation pertinentes (données de mesure), préparation et visualisation des tendances (historiques) des données de mesure.
- Enregistrement et stockage permanent de toutes les données pertinentes pour la facturation (consommation des clients !)
- Si nécessaire, possibilité d'un fonctionnement manuel et d'un fonctionnement d'urgence de l'installation.

Le fonctionnement de l'installation pendant les processus de démarrage et d'arrêt, ainsi que dans des conditions de fonctionnement particulières ou imprévues (maintenance, nettoyage et petites réparations pendant le fonctionnement, défaillance de composants individuels, essais, fonctionnement d'urgence, conditions de charge extrêmes) est généralement effectué manuellement par le personnel d'exploitation (fonctionnement manuel) ou en mode semi-automatique.

Dans le cas des installations de production de chaleur à pression et températures modérées (par exemple, les systèmes d'eau chaude < 110 °C), la présence permanente du personnel d'exploitation n'est généralement pas nécessaire. Dans le cas des installations à eau chaude et à vapeur, une présence permanente peut être nécessaire, ou un équipement de sécurité supplémentaire peut être requis pour un fonctionnement sans intervention humaine (BOME) [66] ou sans surveillance permanente (BOSB). Pour un fonctionnement sans surveillance permanente, les réglementations et directives nationales applicables doivent être vérifiées et respectées (voir chapitre 19).

Le système de contrôle des processus se compose de plusieurs niveaux remplissant différentes tâches (Figure 5. 12).

**Subdivision fonctionnelle et conception technique**

Le système de contrôle des processus peut être subdivisé, en fonction des tâches à accomplir, en un **niveau de commande**, un **système MSR subordonné** (par exemple pour la régulation de composants individuels) et un **système MSR supérieur** (tâches liées à l'ensemble de l'installation). Cette subdivision fonctionnelle aide à définir le concept de régulation et les différentes tâches de régulation, ainsi qu'à établir la description fonctionnelle.

Ces trois niveaux ne représentent toutefois pas les limites physiques des différents composants techniques (unités de régulation) ou les limites de livraison. **La conception technique du système de contrôle des processus** dépend de différents facteurs et ne doit pas nécessairement être structurée de manière analogue aux trois niveaux fonctionnels. Par exemple, le niveau de commande ainsi que les systèmes de mesure, de contrôle et de régulation subordonnés et supérieurs peuvent être réalisés au cas par cas avec un seul API, ou bien être constitués de trois unités distinctes provenant de différents fabricants (qui sont reliées entre elles par des interfaces).

La désignation fonctionnelle de système MSR supérieur et inférieur n'est pas toujours courante chez les techniciens MSR, car ceux-ci s'orientent plutôt vers les composants physiques ou les limites de livraison, ou utilisent éventuellement d'autres désignations (par exemple système maître).

Le **niveau de commande** est réalisé via un ordinateur pilote (ordinateur de la centrale thermique) ou un panneau de commande (écran) sur l'armoire électrique. Le niveau de commande dispose d'interfaces avec les systèmes MSR supérieurs et subordonnés et permet une commande complète de l'installation. À l'aide d'une visualisation de l'installation, il est généralement possible de surveiller le fonctionnement courant de l'installation et les données d'exploitation actuelles et de régler les valeurs de consigne, les programmes horaires et autres paramètres similaires. Avec un niveau d'autorisation supérieur (par exemple, technicien de service, fabricant), il est également possible d'effectuer des réglages détaillés. Le mode de fonctionnement de l'installation (par exemple, automatique, semi-automatique, manuel, etc.) est sélectionné via l'ordinateur pilote ou directement sur l'armoire de commande. Tous les composants essentiels de l'installation peuvent également être commutés manuellement via le niveau de commande. Les éléments de commande situés sur l'armoire de commande permettent également de passer en mode de fonctionnement manuel d'urgence, indépendamment de l'ordinateur pilote.

Le **système MSR supérieur** est responsable de toutes les fonctions de commande et de régulation supérieures, telles que la coordination et la gestion de la charge des différents générateurs de chaleur (signal de puissance pour les chaudières) et la gestion du stockage, ainsi que souvent de la régulation du système hydraulique de la chaufferie (pompes, robinetterie dans la chaufferie) et des pompes du réseau de chaleur (voir également le chapitre 8). Le système MSR supérieur dispose d'interfaces avec les systèmes MSR subordonnés des différents composants de l'installation et les relie entre eux. L'enregistrement des données est souvent réalisé via le système MSR supérieur (voir chapitre 5.10.2).

**Les systèmes MSR subordonnés** servent à la commande et à la régulation spécifiques de groupes fonctionnels individuels de l'installation. Un groupe fonctionnel est par exemple une chaudière à bois avec tous les entraînements, agrégats et raccords associés ou, de manière analogue, le groupe fonctionnel chaudière à mazout/gaz, séparateur de particules, installations de condensation des gaz d'échappement, traitement de l'eau et autres. Ces systèmes MSR subordonnés sont généralement fournis par les fabricants des composants respectifs et, selon le composant, sont conçus comme de simples régulateurs autonomes (par exemple pour une installation de traitement de l'eau) ou comme des API complexes pour une chaudière à bois. Ces systèmes MSR assurent le fonctionnement sécurisé et les tâches détaillées de commande et de régulation des composants individuels. Pour la chaudière à bois, il s'agit par exemple de l'alimentation

en combustible de la chambre de combustion et de la hauteur du lit de combustible sur la grille, des vitesses de la grille, des vitesses de rotation des ventilateurs d'air de combustion et d'évacuation des gaz brûlés (régulation de la dépression), la recirculation des gaz d'échappement et la température de la chambre de combustion, la commande du décendrage, la puissance de combustion, la température de départ de la chaudière, les tâches de commande et de régulation liées à la sécurité, et bien plus encore. Les systèmes de mesure, de commande et de régulation des composants principaux doivent disposer d'une interface et d'une possibilité de communication avec le système de mesure, de commande et de régulation supérieur et le niveau de commande (ordinateur pilote) afin de pouvoir traiter, par exemple, les spécifications de puissance et autres valeurs de consigne supérieures et garantir une visualisation complète de l'installation et un enregistrement des données. Il est recommandé d'intégrer si possible tous les systèmes auxiliaires dans le système MSR supérieur, au moins avec un signal de fonctionnement et de défaut et, le cas échéant, les paramètres de fonctionnement les plus importants. Les régulateurs des différentes stations de transfert d'un réseau de chaleur doivent également être considérés comme des systèmes MSR subordonnés qui fonctionnent de manière autonome, mais qui, conformément à l'état de la technique, disposent également d'une connexion à un système MSR central supérieur, d'une possibilité d'accès à distance et d'une saisie centrale des données (voir chapitre 8.5).

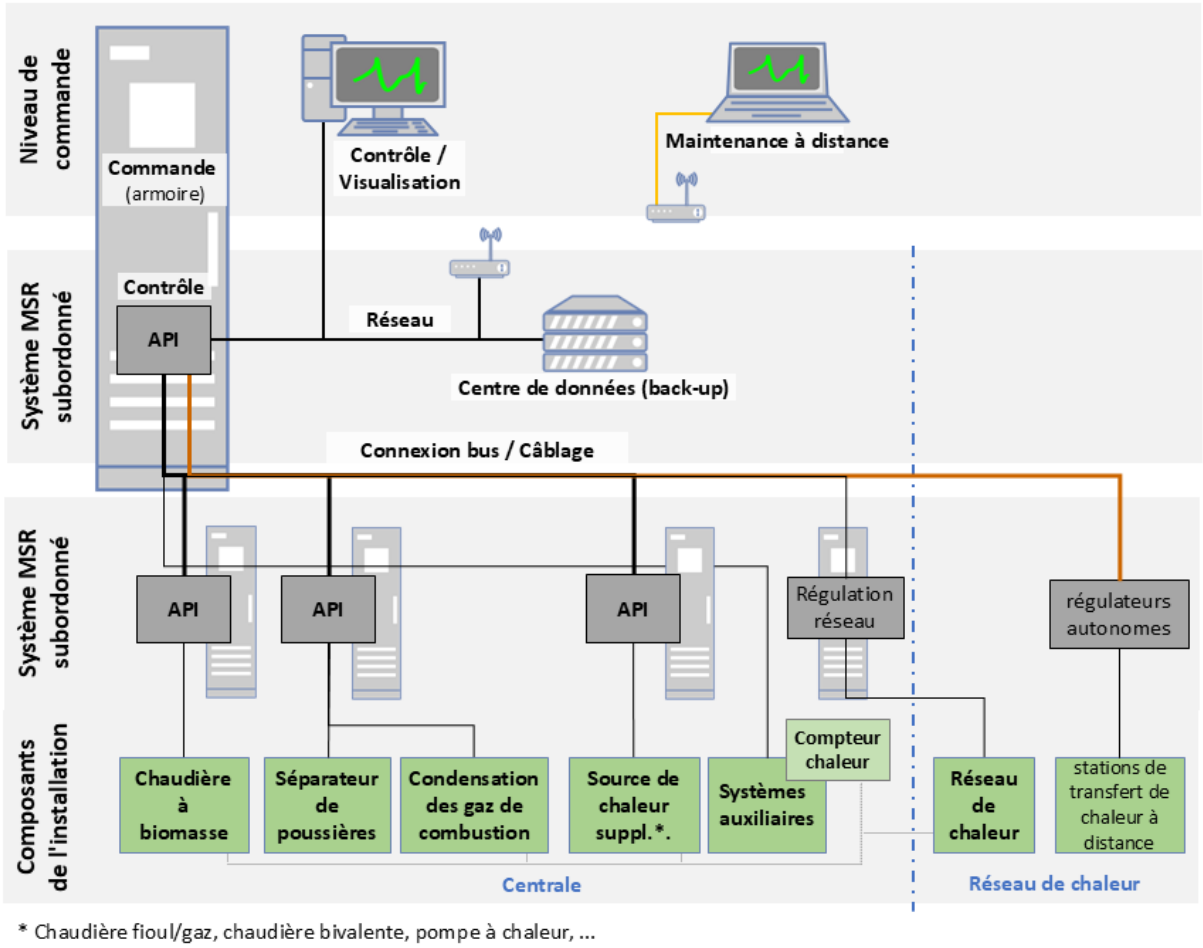



Figure 5. 12 Subdivision fonctionnelle d'un système de contrôle de processus en niveau d'utilisation, système MSR supérieur et systèmes MSR subordonnés (exemple d'une centrale de chauffage au bois avec réseau de chaleur).

**Réalisation technique**

Le système de contrôle des processus et les niveaux mentionnés ci-dessus peuvent être réalisés de différentes manières (voir également le tableau 6 dans les circuits standard QM pour les centrales de chauffage au bois – Partie I [62]). Dans les petites installations, les trois niveaux peuvent souvent être pris en charge par le système MSR de la chaudière à bois, car il n'y a généralement pas d'autres systèmes MSR subordonnés et les chaudières à bois modernes, même en série, offrent déjà la possibilité de réguler les circuits de chauffage, les circuits de charge des accumulateurs ou, par exemple, une installation solaire. Dans ce cas, la commande s'effectue directement via le panneau de commande de la chaudière à bois et sans ordinateur pilote. Des équipements supplémentaires sont généralement nécessaires pour l'enregistrement des données.

Dans les grands bâtiments équipés d'un système de gestion technique du bâtiment, les chaudières à bois sont intégrées en tant que systèmes MSR subordonnés dans la gestion technique du bâtiment (système MSR

supérieur) et dans le niveau de commande qui y est intégré, lequel est également responsable de la saisie des données. Dans les grandes centrales de chauffage au bois, selon le modèle, l'API de la ou des chaudières à bois peut également prendre en charge la tâche de régulation supérieure (par exemple avec une programmation étendue et l'intégration d'autres parties de l'installation), ou il existe un système de régulation supérieur basé sur un API distinct. Alternativement, les tâches de régulation supérieures peuvent également être réparties entre différents régulateurs ou fabricants (par exemple, la régulation du stockage et l'hydraulique de la chaufferie par l'API de la chaudière à bois et la régulation du réseau avec une unité propre au fabricant de la station de transfert de chaleur).

La structure du système de contrôle des processus et, le cas échéant, la répartition des fonctions de régulation entre différents régulateurs/API doivent en tout état de cause être définies en détail lors de la planification et prises en compte en conséquence dans l'appel d'offres et la construction de l'installation.

La structure du système MSR et le concept de régulation sont des éléments importants et intégrants du QM Chauffages au bois (système de gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois) et sont expliqués en détail dans les schémas standard du QM Chauffages au bois [62] et dans le chapitre 7 « Hydraulique de la production de chaleur ».

### 5.10.2 Exigences relatives à l'équipement de mesure et à la saisie des données

Un équipement de mesure complet de la centrale thermique et du réseau de chaleur ainsi qu'une technique de commande appropriée pour la transmission, le stockage et la visualisation des données d'exploitation mesurées sont à la pointe de la technologie des centrales thermiques modernes au bois. Il s'agit là d'une base importante pour une gestion consciencieuse de l'exploitation et pour la mise en œuvre d'une optimisation complète de l'exploitation (voir chapitre 16). Une collecte de données complète et à long terme représente un capital important de savoir-faire qui, outre la gestion et l'optimisation courantes de l'exploitation, est également très précieux pour la planification des extensions futures des installations ainsi que pour la modernisation et la rénovation des installations (voir chapitre 18). Pour faciliter la planification et la mise en œuvre de la collecte de données, QM Chauffages au bois fournit, en combinaison avec les circuits standard, une liste complète des points de mesure (voir [62]) ainsi que des recommandations pour la présentation et l'évaluation des données d'exploitation (voir FAQ 8).

Le système de collecte des données et la visualisation (sur PC dans la salle de contrôle – voir figure 5.24) doivent notamment répondre aux exigences minimales suivantes :

- Enregistrement et stockage automatiques de toutes les valeurs mesurées avec une résolution temporelle élevée (recommandation QM Chauffages au bois [62] : intervalle de mesure de 10 s et intervalle d'enregistrement de 5 minutes recommandés)
- Visualisation de l'installation à l'aide de graphiques qui indiquent les principaux paramètres de fonctionnement et les états de fonctionnement des différents composants (valeurs instantanées)
- Représentation graphique des évolutions dans le temps (tendances) sous forme de diagrammes et de paramètres configurables
- Possibilité d'exportation conviviale de toutes les données de fonctionnement mesurées, calculées et enregistrées dans un format de données lisible par tous (par exemple, fichiers texte au format .csv)
- Sauvegarde régulière de toutes les données d'exploitation sur un système indépendant

Grâce à la communication de données dans le réseau de chauffage à distance, les données d'exploitation des stations de transfert de chauffage à distance devraient également être intégrées dans la technique de contrôle-commande et l'enregistrement des données (voir chapitre 8.5). En ce qui concerne la lecture à distance des données des clients, les directives applicables en matière de protection des données doivent être respectées. Il est recommandé d'inclure la question de l'accès à distance et de la lecture à distance des données dans le contrat de fourniture de chaleur ou de conclure un accord ultérieur avec les clients existants.

Pour faciliter la gestion et la surveillance des installations, les centrales de chauffage au bois modernes disposent également d'un accès à distance à la visualisation et à la régulation pour le personnel d'exploitation. Cette possibilité devrait également être prévue pour les planificateurs et certains fabricants afin de permettre un accès rapide aux données actuelles de l'installation en cas de besoin. Si plusieurs personnes/entreprises disposent d'un tel accès à distance, les responsabilités et les compétences doivent être clairement définies (le cas échéant avec des autorisations limitées) et chaque modification (par exemple, le réglage des valeurs de consigne ou des paramètres de régulation) doit être documentée et communiquée.

### 5.10.3 Planification et exécution

La planification de la technique de contrôle-commande doit être prise en compte dans le processus de planification général. À ce stade, le planificateur principal doit notamment définir dès le début la conception et la structure du système de contrôle-commande (voir chapitre 5.10.1) ainsi que les responsabilités qui en découlent, puis les prendre en compte dans les cahiers des charges des appels d'offres et des commandes.

Une description fonctionnelle complète doit être établie au cours de la planification. Celle-ci sert notamment de base à la planification détaillée et à l'exécution (en particulier le raccordement hydraulique et la régulation), mais elle est également une condition préalable fondamentale pour une optimisation réussie de l'exploitation.

Les descriptions fonctionnelles définissent les principes de base du concept de régulation correspondant en mettant l'accent sur la régulation globale (gestion de la charge, gestion du stockage, centrale de chauffage hydraulique, réseau de chaleur). La programmation détaillée et la mise en œuvre du concept de régulation incombent aux techniciens MSR des fabricants ou des fournisseurs. Par exemple, la mise en œuvre du système de mesure, de contrôle et de régulation subordonné pour les chaudières à bois est généralement comprise dans la livraison de la chaudière. Il incombe au planificateur principal de vérifier le respect des exigences fondamentales relatives aux systèmes de mesure, de contrôle et de régulation et à la saisie des données conformément à la description fonctionnelle et aux cahiers des charges.

La description fonctionnelle comprend les éléments essentiels suivants :

- Description détaillée du fonctionnement de l'installation pour tous les états de fonctionnement pertinents (y compris la description de la régulation)
- Aperçu des paramètres de régulation les plus importants et adaptables en cours de fonctionnement
- Liste complète des points de mesure, conforme au schéma hydraulique. Pour chaque point de mesure, la position de mesure, la plage de mesure, la résolution temporelle et la précision de mesure doivent être indiquées (voir chapitre 16).
- Description de l'enregistrement automatique des données (principe de base et structure des données ou des fichiers, lieu et durée de stockage des données, etc.)

Lors de la mise en œuvre de la technique de contrôle-commande, il convient de prêter une attention particulière aux points suivants (voir également l'appel d'offres type pour les chaudières à bois de QM Chauffages au bois):

- Emplacement protégé contre la poussière et garantie que la température maximale de fonctionnement des composants électroniques n'est pas dépassée. En cas de charges thermiques internes élevées (par exemple dues à des convertisseurs de fréquence), une ventilation/climatisation doit être prévue.
- Prévoir une réserve d'espace d'environ 20 % dans les armoires électriques ou pour des armoires électriques supplémentaires (extension de l'installation).
- Standardisation optimale des composants utilisés (par exemple, armoires électriques normalisées, capteurs uniformes dans la mesure du possible, etc.
- Garantie de la compatibilité des composants et des systèmes utilisés ainsi que de la communication entre tous les niveaux et toutes les parties du système.
- Garantir la disponibilité à long terme des pièces de rechange.
- Définir des responsabilités claires et des limites de livraison et des interfaces sans ambiguïté.
- Respect de toutes les réglementations, normes et directives pertinentes.
- Documentation technique complète, y compris schémas électriques, fiches techniques et listes de points de données (à intégrer dans le cahier des charges des appels d'offres).
- Étiquetage clair et professionnel des appareils de terrain et du câblage.
- Tous les messages d'erreur des composants individuels doivent être transmis à l'API supérieur via des contacts sans potentiel.
- Niveau de commande manuelle avec étiquetage en texte clair pour la commande manuelle des composants les plus importants (pertinents pour la sécurité) de l'installation. Le niveau de commande manuelle doit être équipé d'un verrouillage.
- Possibilité d'accès à distance et de transmission des messages d'erreur.
- Possibilité d'attribuer des autorisations d'accès et des droits d'utilisateur spécifiques.

Instructions et descriptions adaptées à l'utilisateur et faciles à comprendre pour le personnel d’exploitation.



Figure 5. 13 Salle de contrôle d'une centrale de cogénération au bois (source: AEE INTEC).

Les descriptions fonctionnelles définissent les principes de base du concept de régulation correspondant en mettant l'accent sur la régulation globale (gestion de la charge, gestion du stockage, centrale de chauffage hydraulique, réseau de chaleur). La programmation détail-

lée et la mise en œuvre du concept de régulation incombent aux techniciens MSR des fabricants ou des fournisseurs. Par exemple, la mise en œuvre du système de mesure, de contrôle et de régulation subordonné pour les chaudières à bois est généralement comprise dans la livraison de la chaudière. Il incombe au planificateur principal de vérifier le respect des exigences fondamentales relatives aux systèmes de mesure, de contrôle et de régulation et à la saisie des données conformément à la description fonctionnelle et aux cahiers des charges.

La description fonctionnelle comprend les éléments essentiels suivants :

- Description détaillée du fonctionnement de l'installation pour tous les états de fonctionnement pertinents (y compris la description de la régulation)
- Aperçu des paramètres de régulation les plus importants et adaptables en cours de fonctionnement
- Liste complète des points de mesure, conforme au schéma hydraulique. Pour chaque point de mesure, la position de mesure, la plage de mesure, la résolution temporelle et la précision de mesure doivent être indiquées (voir chapitre 16).
- Description de l'enregistrement automatique des données (principe de base et structure des données ou des fichiers, lieu et durée de stockage des données, etc.)

Lors de la mise en œuvre de la technique de contrôle-commande, il convient de prêter une attention particulière aux points suivants (voir également l'appel d'offres type pour les chaudières à bois de QM Chauffages au bois):

- Emplacement protégé contre la poussière et garantie que la température maximale de fonctionnement des composants électroniques n'est pas dépassée. En cas de charges thermiques internes élevées (par exemple dues à des convertisseurs de fréquence), une ventilation/climatisation doit être prévue.
- Prévoir une réserve d'espace d'environ 20 % dans les armoires électriques ou pour des armoires électriques supplémentaires (extension de l'installation).
- Standardisation optimale des composants utilisés (par exemple, armoires électriques normalisées, capteurs uniformes dans la mesure du possible, etc.
- Garantie de la compatibilité des composants et des systèmes utilisés ainsi que de la communication entre tous les niveaux et toutes les parties du système.
- Garantir la disponibilité à long terme des pièces de rechange.
- Définir des responsabilités claires et des limites de livraison et des interfaces sans ambiguïté.
- Respect de toutes les réglementations, normes et directives pertinentes.
- Documentation technique complète, y compris schémas électriques, fiches techniques et listes de points de données (à intégrer dans le cahier des charges des appels d'offres).
- Étiquetage clair et professionnel des appareils de terrain et du câblage.
- Tous les messages d'erreur des composants individuels doivent être transmis à l'API supérieur via des contacts sans potentiel.
- Niveau de commande manuelle avec étiquetage en texte clair pour la commande manuelle des composants les plus importants (pertinents pour la sécurité) de l'installation. Le niveau de commande manuelle doit être équipé d'un verrouillage.
- Possibilité d'accès à distance et de transmission des messages d'erreur.
- Possibilité d'attribuer des autorisations d'accès et des droits d'utilisateur spécifiques.
- Instructions et descriptions adaptées à l'utilisateur et faciles à comprendre pour le personnel d'exploitation.

# 6 Composants pour le stockage, le transport et le décendrage des combustibles

## 6.1 Remarque préliminaire

Ce chapitre décrit les composants du stockage, du transport et du décendrage du combustible. Le choix et le dimensionnement appropriés de ces composants sont décrits au chapitre 14.

Le chapitre «19 » répertorie les exigences spécifiques à chaque pays en matière de dispositifs de sécurité des composants correspondants en ce qui concerne la protection contre les incendies, la protection contre les explosions (ATEX, informations BGI 739-2) et la prévention des accidents (barrières lumineuses, dispositifs d'arrêt, dispositifs de sécurité d'accès, dispositifs de protection contre les chutes, aspiration des gaz de fermentation, etc.).

## 6.2 Stockage de combustible

**Silos à combustible avec système d'extraction**
Les silos à combustible conviennent aux plaquettes de bois secs à très humides et aux briquettes avec un mélange limité de sciure et de poussière. Ils sont faciles à remplir en déversant le combustible depuis le camion. Comme ils sont généralement conçus comme des silos souterrains (Figure 6.1), leur volume de stockage est coûteux (travaux de terrassement et béton armé). Les silos à combustible sont équipés d'un système d'extraction automatique (voir chapitre14.3) qui extrait le combustible stocké du silo.



Figure 6.1 Silo enterré (source : Andres Jenni).

**Système de conteneurs mobiles avec extraction**
Le remplissage du système de conteneurs mobiles (Figure 6.2) avec des plaquettes de bois s'effectue généralement dans la forêt ou par le fournisseur de combustible sur son site.

Le conteneur rempli (volume de remplissage d'environ 30 $m^3$) est livré et déposé par camion. Le système d'extraction intégré au conteneur est couplé au dispositif d'alimentation fixe du foyer. Le système de combustion commande l'extraction du combustible du conteneur. Un deuxième conteneur plein est disponible en réserve afin de pouvoir être utilisé immédiatement en cas de besoin pour ne pas interrompre l'alimentation continue en combustible. Selon la puissance nominale de la centrale thermique, plusieurs conteneurs sont nécessaires. Une livraison continue de plaquettes de bois dans des conteneurs est indispensable. Les conteneurs peuvent également être loués.

Les conteneurs mobiles pour plaquettes de bois avec extraction sont adaptés pour les plaquettes de bois, les écorces broyées et la sciure. La technologie d'extraction est, dans une certaine mesure, insensible aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux pierres. Elle peut servir de remplacement ou d'alternative aux silos à combustible fixes (immobiles).

Les avantages sont qu'il n'y a pas d'investissement pour un silo fixe et que les temps de déchargement lors de la livraison des plaquettes de bois sont courts.

En revanche, l'inconvénient est la dépendance vis-à-vis du fournisseur de combustible. De plus, des surfaces de stockage à l'extérieur du système de chauffage sont nécessaires. En hiver notamment, un simple pare-vue pour les conteneurs s'avère avantageux (protection contre le vent). Les coûts d'exploitation sont relativement élevés en raison des frais de location des conteneurs. En hiver, il existe un risque de gel.



Figure 6.2 Conteneurs mobiles à plaquettes de bois avec extraction en remplacement d'un silo (source: Energie-bois Suisse).

**Silos ronds hors sol**
Les silos ronds hors sol (Figure 6.3) conviennent aux combustibles d'une granulométrie maximale de P63, d'une longueur maximale de particules de 200 mm et d'une teneur en eau comprise entre sèche et > 55 %. Ils sont utilisés dans les grandes centrales de chauffage au bois où les temps de transbordement du combustible dans le silo sont courts. Cela permet d'éviter la formation de ponts.

Le remplissage s'effectue généralement à l'aide de convoyeurs à chaînes à raclettes et d'un système de distribution situé au-dessus du silo circulaire. L'extraction s'effectue à l'aide d'une vis sans fin (voir chapitre 6.4.1)



Figure 6.3 Silo circulaire (source: Gottwald GmbH Maschinenbau).

**Silos à plaquettes**

Les silos à plaquettes (Figure 6.4) conviennent pour les plaquettes de bois, la sciure et la poussière de ponçage provenant des entreprises de transformation du bois, mais aussi pour les plaquettes de bois secs et les briquettes. Le remplissage s'effectue généralement de manière pneumatique. Les exigences relatives aux dispositifs de sécurité en matière de protection contre les explosions (ATEX) doivent être particulièrement respectées (voir chapitre 19, Prescriptions pour les silos à plaquettes).



Figure 6.4 Silo à plaquettes (source: Énergie-bois Suisse).

**Stockage des granulés**

Les granulés de bois sont stockés dans des locaux ou des conteneurs fermés et secs. Des réservoirs en acier, en plastique ou en tissu sont disponibles prêts à monter. Le remplissage s'effectue généralement de manière pneumatique, mais aussi parfois par basculement dans le cas de silos souterrains de grande taille. Dans les petits entrepôts, l'extraction s'effectue à l'aide de vis sans fin ou par voie pneumatique, tandis que dans les entrepôts plus grands, on installe souvent un système d'extraction à bras articulé. Afin de réduire au maximum la quantité de fines, les granulés doivent être introduits et déchargés de l'entrepôt avec précaution et par le chemin le plus court possible. Il ne faut pas prévoir de dispositifs d'alimentation supplémentaires, tels que ceux utilisés pour le stockage des plaquettes de bois (p.ex. des distributeurs de silo). Il faut absolument éviter toute infiltration d'eau dans le silo (p. ex. par les parois ou les dispositifs de remplissage) et toute formation de condensation dans le silo (p. ex. au niveau des conduites d'eau froide, des parois/plafonds froids et non isolés du silo ou par l'introduction d'air humide dans le silo à pellets froid). Vous trouverez de plus amples informations dans la **brochure « *Lagerung von Holzpellets*** » (Stockage des granulés de bois) du DEPV [67] et de proPellets (voir également le chapitre 14.2.9).

**Entrepôt**

Pour les grandes centrales de chauffage au bois dont la puissance de la chaudière à bois est supérieure à 1 MW, il convient d'envisager des entrepôts (Figure 6.5) avec silo journalier à la place de silos souterrains coûteux. Les entrepôts conviennent à tous les combustibles. Le remplissage est coûteux, car les combustibles doivent généralement être acheminés depuis une benne de déchargement jusqu'à la hauteur du faîte à l'aide d'un système de convoyage, puis répartis dans l'entrepôt ou manipulés à l'aide d'une chargeuse sur pneus. L'entrepôt lui-même est en revanche peu coûteux. Les entrepôts sont également utilisés comme lieux de stockage intermédiaire.



Figure 6.5 Entrepôt (source: Franz Promitzer).

**Entrepôt extérieur**

Les plaquettes de bois ou l'écorce peuvent être entreposés à l'air libre sur des tas (Figure 6.6) ou les grumes sur des piles (Figure 6.7). Le stockage extérieur peut se faire directement à proximité de la centrale thermique, dans un endroit central accessible toute l'année aux camions, ou dans la forêt.



Figure 6.6 Stockage temporaire de plaquettes de bois à l'air libre (source : AEE INTEC).



Figure 6.7 Tas de bois près de la centrale de chauffage (source : AEE INTEC).

## 6.3 Remplissage de silos et d'entrepôts

### 6.3.1 Remplissage de silos à plaquettes de bois

Le remplissage des silos enterrés s'effectue généralement en déversant le combustible depuis le camion par une ouverture de remplissage. Une disposition optimale des ouvertures de remplissage ou l'utilisation de répartiteurs de silo permet d'atteindre un taux de remplissage élevé.

**Couvercle de silo**
Dans le cas des silos au niveau du sol qui sont remplis directement par des camions, la conception du couvercle du silo est très importante. Si le couvercle du silo n'est pas carrossable, il doit être posé sur un rebord en béton d'au moins 20 cm de haut (Figure 6.8 et Figure 6.10). Cela permet d'empêcher la pénétration de l'eau de pluie. Si un couvercle praticable (Figure 6.9) est nécessaire, il faut veiller à ce qu'après le remplissage, il puisse être fermé sans nettoyage de la gouttière et de la zone des charnières. En raison de leur coût élevé et du problème des infiltrations d'eau, les couvercles de silos praticables doivent être évités dans la mesure du possible.

Les couvercles de silo peuvent également être fabriqués en plusieurs parties. Cela améliore leur solidité et leur poids réduit facilite leur manipulation. De plus, cette configuration permet de réduire la quantité de plaquettes de bois tombant sur les côtés de l'ouverture de remplissage et évite tout risque d'endommagement du couvercle du silo lorsque les plaquettes de bois glissent du camion sous forme de bloc compact.

Conformément aux prescriptions locales en matière de prévention des accidents (voir également le chapitre19 ), l'ouverture de remplissage doit généralement être recouverte d'une grille de protection ou d'une grille. Les plaquettes de bois ayant tendance à former des ponts, ils peuvent se fixer sur la grille de protection lors du remplissage, ce qui ralentit le flux de matière et prolonge la durée de déchargement.

Pour un déchargement sans problème, le couvercle du silo doit pouvoir s'ouvrir à plus de 90°, c'est-à-dire au-delà du point mort. Cela laisse suffisamment d'espace pour le camion à benne basculante et empêche en même temps le couvercle du silo de se refermer.



Figure 6.8 Couvercle de silo non praticable à l'état ouvert (source: Schmid AG energy solutions).



Figure 6.9 Couvercle de silo non praticable à l'arrière-plan et praticable au premier plan. Les deux sont fermés. (source: Schmid AG energy solutions).



Figure 6.10 Couvercle pliable non praticable, à gauche fermé, au milieu ouvert, à droite en cours de remplissage (Source : Patrik Küttel).

**Vis de remplissage**

Dans les silos situés dans les sous-sols des bâtiments, des vis de remplissage (Figure 6.11) assurent le transport du combustible depuis la trémie de remplissage (benne de déversement) vers le silo et augmentent en outre son niveau de remplissage. Les vis de remplissage disposées horizontalement transportent le combustible sous le couvercle du silo sur toute la longueur du silo jusqu'à la paroi plongeante. Grâce au débit élevé des vis de remplissage (> 200 m³/h), les temps de déchargement peuvent être inférieurs à 10 minutes, même lors du dernier déchargement. Les vis de remplissage conviennent à tous les types de plaquettes de bois, d'écorces broyées et de sciure. Elles sont également insensibles aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux pierres.

Avantages :

- Taux de remplissage élevé des silos, qui sont principalement situés sous un bâtiment.
- Meilleure utilisation de l'espace pour l'installation de chauffage.

Inconvénients :

- Coûts d'investissement supplémentaires
- Temps de déchargement légèrement plus longs pour le fournisseur de combustible.



Figure 6.11 Vis de remplissage (source: Energie-bois Suisse).

**Distributeur de silo**

Le distributeur de silo (Figure 6.12) transporte les plaquettes de bois horizontalement afin que le silo soit rempli de manière uniforme, quelle que soit sa forme. Le distributeur de silo fonctionne comme une vis sans fin de remplissage, mais agit dans deux directions opposées à partir de l'ouverture de remplissage. Les convoyeurs à vis sans fin disposés horizontalement transportent le combustible sous le plafond du silo sur toute la longueur de celui-ci. Grâce au débit élevé des vis de remplissage (> 250 m³/h), les temps de déchargement peuvent être inférieurs à 10 minutes, même lors du dernier déchargement. Si les conditions architecturales le permettent, il est préférable d'installer trois couvercles de silo plutôt qu'un seul couvercle avec distributeur. Les distributeurs de silo conviennent à tous les types de plaquettes de bois, d'écorce broyée et de sciure. Ils sont également insensibles aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux pierres.

Les avantages des distributeurs de silo sont les suivants:

- Faible consommation d'énergie
- Indépendants de la forme du combustible et de la teneur en eau
- Insensibles aux corps étrangers de grande taille
- Silos longs possibles
- Économie de couvercles de silo supplémentaires.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- Coûts d'investissement supplémentaires



Figure 6.12 Distributeur de silo (source: Schmid AG energy solutions).

**Système de convoyeur à vis vertical pour silos et entrepôts hors sol**

Dans les silos et entrepôts hors sol, le système de convoyeur à vis vertical (Figure 6.13) assure le transport du combustible depuis la trémie de déversement vers le silo ou l'entrepôt. Une vis sans fin horizontale transporte le

combustible de la trémie vers le système de convoyage à vis sans fin vertical. Celui-ci le transporte verticalement vers le haut (hauteur de transport maximale d'environ 18 m) et le transfère ensuite aux vis sans fin de distribution horizontales. La capacité de transport atteint environ 60 m³/h ou 120 m³/h avec un système à double vis sans fin, à condition que le volume de la benne de déchargement soit supérieur au volume de transport du véhicule de livraison. Le système de transport à vis sans fin vertical convient à tous les types de plaquettes de bois, d'écorce et de sciure. La taille maximale des morceaux est de P100.

Les avantages du système sont les suivants :

- Taux de remplissage élevé
- Faibles coûts de construction du silo

Parmi les principaux inconvénients, on peut citer :

- Coûts d'investissement supplémentaires
- Des pauses pouvant aller jusqu'à une heure doivent être observées entre chaque livraison.



Figure 6.13 Système de convoyeur à vis vertical (source: Schmid AG energy solutions).



Figure 6.14 Camion-souffleur (source: Amstutz Holzenergie AG).

**Conteneur de pompage camion-souffleur**
Un camion-souffleur (Figure 6.14) permet de remplir des silos lorsqu'il n'est pas possible d'accéder directement avec des véhicules de livraison pour le déchargement. Les plaquettes de bois sont pompées directement depuis le conteneur/véhicule de livraison (volume de remplissage d'environ 30 m³) vers le silo souterrain ou en surface à l'aide du système de déchargement interne via des conduites flexibles. Le conteneur est basculé pour permettre une vidange complète. Les camions-souffleurs sont mobiles et polyvalents et conviennent particulièrement aux plaquettes sèches de qualité provenant de résidus forestiers et industriels contenant peu de fines. Le système est sensible aux particules de combustible surdimensionnées et aux pierres.
Ses principaux avantages sont les suivants :

- Pas de salissure du lieu de déchargement par des plaquettes de bois tombés à côté
- Économie des investissements pour les systèmes d'alimentation et de distribution habituels
- Taux de remplissage maximal du silo (jusqu'à 90 %)

Ses inconvénients sont les suivants:

- Dépendance vis-à-vis du fournisseur de bois-énergie
- Temps de déchargement plus longs (environ 30 minutes contre environ 5 minutes pour les camions à benne basculante)
- Formation de poussière avec les plaquettes de bois sèches, ne convient pas pour la poussière de ponçage et les plaquettes de rabotage
- Coûts de livraison plus élevés
- Bruit causé par le système de pompage

## 6.3.2 Remplissage et gestion des entrepôts

**Système de grue entièrement automatique**
Le système de grue entièrement automatisé sert au chargement et au déchargement des entrepôts (Figure 6.15). Une grue à grappin automatique ou manuelle saisit le bois-énergie dans un tas ou une trémie de déchargement, le répartit dans l'entrepôt et l'achemine vers un silo journalier ou la zone à fond mouvant. Si nécessaire, il est également possible de mélanger différentes qualités de combustible. Le système est indépendant de la hauteur et de la surface à l'intérieur des voies de roulement. Si le volume de déchargement est supérieur au volume de transport du véhicule de livraison, des performances allant jusqu'à 150 m$^3$ /h peuvent être atteintes. Le système de grue entièrement automatique convient à tous les combustibles bois, à l'exception de la sciure et de la poussière, et est insensible aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux pierres.

Ses principaux avantages sont les suivants :

- Adaptable à la gamme de combustibles
- Gestion automatique possible
- Mélange de différentes qualités de combustible
- Bonne utilisation de l'espace de stockage

Les inconvénients sont les suivants :

- Utilisation judicieuse uniquement pour grands entrepôts

- Fonctionnement coûteux (usure des câbles en acier, usure du dispositif de levage, obligation légale d'entretien). La charge de travail élevée nécessite un système de grue conforme aux normes industrielles.




Figure 6.15 Système de grue entièrement automatique avec benne de déchargement et silo journalier (source: Schmid AG energy solutions).

**Système de chargement et de déchargement avec convoyeur à chaîne à raclettes déplaçable horizontalement et verticalement**

Les convoyeurs à chaîne à raclettes avec transporteurs transversaux sont montés dans un châssis qui peut être déplacé aussi bien verticalement qu'horizontalement (Figure 6.16 ). Le système de chargement et de déchargement s'adapte ainsi automatiquement au niveau de remplissage de l'entrepôt. Lors du chargement, le système sert de distributeur, tandis que lors du déchargement, il achemine les plaquettes de bois vers le système de transport de combustible de la chaudière. La longueur d'utilisation peut atteindre 28 m. À l'exception de la poussière, le système convient à tous les combustibles bois et est insensible aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux pierres.

Ses principaux avantages sont les suivants :

- Utilisation optimale du volume du hangar
- Adaptable à la gamme de combustibles
- Peut stocker différentes gammes de combustibles de manière contrôlée dans différentes voies et les décharger de manière ciblée.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- Uniquement utile pour les grands volumes de stockage
- Construction coûteuse



Figure 6.16 Système de chargement et de déchargement avec convoyeur à chaîne à raclettes déplaçable horizontalement et verticalement [68].

**Chargeuse sur pneus**

La chargeuse sur pneus (ou chargeuse télescopique) transporte le bois-énergie livré ou fraîchement coupé sur place vers l'entrepôt ou le déverse sur le tas (Figure 6.17). De là, un pré-silo est rempli si nécessaire. Le système est laborieux et prend beaucoup de temps. La chargeuse sur pneus ne peut pas être automatisée, mais elle est très flexible et peut être utilisée pour diverses tâches. Elle convient à tous les types de combustibles, à l'exception de la sciure et de la poussière.

Les principaux avantages de la chargeuse sur pneus sont les suivants :

- Indépendante de l'espace, utilisation multiple possible
- Adaptation optimale au combustible
- Possibilité de séparer différents types de combustibles

Ses inconvénients sont les suivants :

- Nécessite beaucoup de personnel
- Consommation d'énergie élevée
- Bruit



Figure 6.17 Chargeuse sur pneus (source : AEE INTEC).

**Toploader**

Un chargeur par le haut ou Toploader (Figure 6.18) est un système de chargement et de déchargement qui ne nécessite pas de trémie de déversement. Il stocke dans l'entrepôt le volume transporté par le véhicule de livraison et déversé sur le sol de l'entrepôt. Si nécessaire, le chargeur par le haut transporte le combustible de l'entrepôt empilé vers le canal de déchargement transversal, situé derrière la paroi arrière de l'entrepôt. Le système convient à tous les combustibles, à l'exception des plaquettes et de la poussière, et est insensible aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux pierres.

Le Toploader présente plusieurs avantages :

- Possibilité d'utiliser l'espace de stockage à plusieurs fins
- Déversement simple et à niveau du combustible
- Faibles coûts de construction de l'espace de stockage à partir de la dalle de fondation, faibles exigences statiques
- Facilité d'entretien grâce à une bonne accessibilité
- Faible consommation d'électricité
- Gestion automatique, y compris mesure du niveau de remplissage

Parmi les inconvénients, on peut citer :

- Pas de stockage intermédiaire du combustible, le combustible stocké en dernier est le premier à être déstocké
- Encombrement relativement important (zone de stationnement du chargeur par le haut)



Figure 6.18 Toploader (source: Vecoplan AG).

## 6.3.3 Remplissage des silos à plaquettes

La poussière, la sciure et les plaquettes de bois sèches dont la teneur en eau est inférieure à 20 % sont stockés dans des silos à plaquettes (Figure 6.19). Le remplissage d'un silo à plaquettes est toujours combiné avec le système d'aspiration des plaquettes utilisé dans l'entreprise. Une déchiqueteuse peut également être raccordée au système d'aspiration. Le remplissage du silo à plaquettes avec le combustible sec et fin s'effectue à l'aide d'un flux d'air généré par un ventilateur à pression. En raison de la section transversale agrandie dans le silo, le flux de transport se détend et le combustible tombe dans le silo. Un système de filtration à nettoyage automatique sépare les particules fines de l'air évacué. Dans les systèmes d'aspiration centralisés, un filtre cyclone sépare l'air de transport du bois-énergie. Selon la quantité de particules fines, un système de filtration supplémentaire est nécessaire pour l'air évacué. Dans les systèmes de transport individuels, l'air de transport est recyclé et réutilisé.

Le système de remplissage des silos à plaquettes est indépendant de la différence de hauteur à franchir et de la taille du silo. Il doit être conçu précisément pour l'assortiment de bois-énergie concerné et réagit de manière sensible aux pierres et aux morceaux de combustible surdimensionnés. Selon l'insonorisation et la taille des morceaux de combustible, il est plus ou moins bruyant.

Les avantages de ce système sont les suivants :

- Bonne adaptation possible à la structure du bâtiment
- Sans poussière
- Franchissement aisé de grandes distances horizontales et verticales

Les inconvénients sont les suivants :

- Convient uniquement aux combustibles secs de petite taille
- Bruyant
- Nécessite des silos supplémentaires
- Risque d'explosion dû à la présence de poussière
- Consommation électrique élevée

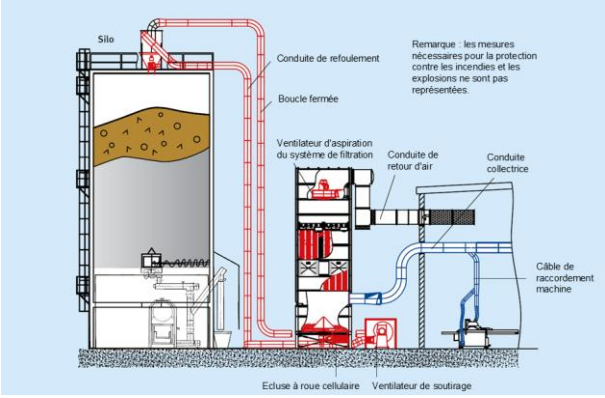



Figure 6.19 Remplissage du silo à l'aide du système d'aspiration de sciure de l'entreprise (source: BGI 739-2 [69]).

### 6.3.4 Remplissage des silos à pellets

Les pellets sont généralement livrés au consommateur final à l'aide d'un camion-citerne. Le remplissage du silo à granulés s'effectue alors à l'aide d'un tuyau que le chauffeur raccorde à une tubulure de remplissage du silo et par lequel les granulés sont soufflés du véhicule dans le silo. Lors du soufflage des granulés, une compensation de pression doit être effectuée. Les silos étanches à l'air sont équipés à cet effet d'un deuxième raccord auquel est raccordé un ventilateur d'aspiration avec sac à poussière lors du remplissage. Seuls les silos en tissu peuvent se passer d'un tel raccord d'aspiration, car dans ce système, l'air insufflé avec les granulés peut s'échapper du silo à travers le tissu. La pression nécessaire au remplissage du silo est générée par de l'air comprimé.




Figure 6.20 Livraison de pellets avec sac d'aspiration (source : Energie-bois Suisse).

Si le silo à pellets est un silo enterré, le remplissage peut également s'effectuer par déversement. La livraison de grandes quantités de pellets peut également s'effectuer à l'aide d'un véhicule équipé d'un fond mouvant qui pousse les pellets dans le silo. Le déversement ou le poussage peut être plus doux pour les granulés que le soufflage, mais il présente certains inconvénients. Il faut ainsi prévoir un silo supplémentaire, éventuellement accessible aux véhicules, à l'extérieur du bâtiment, et l'ouverture de remplissage présente un risque d'infiltration d'humidité dans le silo.

## 6.4 Extraction

### 6.4.1 Systèmes d'extraction pour tous les combustibles

**Fond mouvant**

Le fond poussant (Figure 6.21) permet une extraction continue du bois-énergie dans les silos de grande taille. Une ou plusieurs tiges de poussée sont déplacées horizontalement vers l'avant et vers l'arrière par des vérins hydrauliques. Le combustible est poussé dans le canal d'extraction par des entraîneurs en forme de coin. Dans les installations modernes, les tiges de poussée avancent ensemble et reculent individuellement. Cela permet de réduire les forces de poussée de chaque tige. Les forces exercées par les vérins hydrauliques doivent être absorbées par le bâtiment. Le poids au-dessus du système de poussée détermine les forces de poussée nécessaires, et l'ensemble du dispositif doit être adapté au silo. Le fond poussant convient à tous les combustibles. En cas d'utilisation d'écorces et de bois d'entretien du paysage grossièrement broyé, il est recommandé d'installer un rouleau de dosage supplémentaire. Le fond poussant est insensible aux morceaux de com-bustible surdimensionnés et aux pierres. Il convient aux silos enterrés, aux entrepôts, aux silos à plaquettes, aux entrepôts à pellets et aux conteneurs mobiles à plaquettes de bois.

Les principaux avantages du fond mouvant sont les suivants:

- Fiable et indépendant de la teneur en eau du combustible
- Aucune pièce d'entraînement dans le silo
- Indépendant de la forme et de la taille du bois-énergie

Les inconvénients du fond mouvant sont les suivants :

- Forces de poussée élevées sur le bâtiment
- Usure du revêtement de sol en cas de consommation annuelle élevée de combustible
- Longueur et quantité de transport limitées
- Utilisation uniquement en ligne droite possible
- Émissions sonores parfois élevées



Figure 6.21 Extraction du silo par fond mouvant (source : Schmid energy solutions).

**Convoyeur à fond mouvant**

Le convoyeur à fond mouvant est utilisé dans les silos de petite taille (pré-silo, silo journalier) (Figure 6.22). Il fonctionne de manière similaire à un convoyeur à bande.

Des profilés transversaux fixés sur des chaînes de transport transportent le bois énergie. L'installation est adaptée à la configuration du silo. La largeur et la hauteur du silo déterminent le nombre de chaînes de transport. Le convoyeur à fond mouvant est posé sur le combustible, ce qui lui permet d'atteindre un débit élevé. Le système convient à tous les combustibles sauf la poussière et est insensible aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux pierres.

Les principaux avantages du convoyeur à fond racleur sont les suivants :

- Grande adaptabilité au combustible et à la configuration du silo

Les inconvénients sont les suivants :

- Pièces d'entraînement dans le silo
- Coûts d'investissement élevés
- Coûts élevés d'entretien et de réparation
- Construction complexe

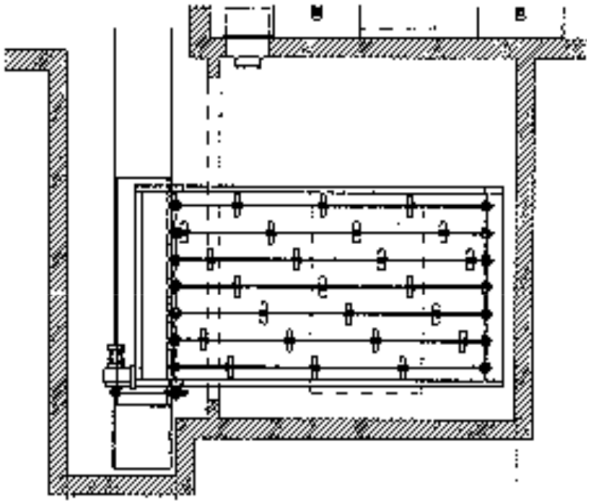


Figure 6.22 Extraction du silo par fond racleur [68].

**Vis centrale**

La vis centrale permet de vider les silos carrés et ronds. La vis centrale décrit un cercle autour du centre au fond du silo et transporte le combustible horizontalement vers le centre du silo. Le diamètre effectif est > 4 m. Le système convient aussi bien aux plaquettes de bois secs qu'aux plaquettes de rabotage, à la poussière et aux granulés. Il est sensible aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux pierres.

Les avantages de la vis sans fin centrale sont les suivants:

- Construction simple
- Faible tendance à la formation de ponts
- Hauteurs de silo importantes possibles (à condition de disposer d'ouvertures d'entretien appropriées pour le déblayage)

Les inconvénients sont les suivants :

- Sensible aux particules de combustible surdimensionnées et aux pierres (tri nécessaire)
- Pièces d'entraînement dans le silo

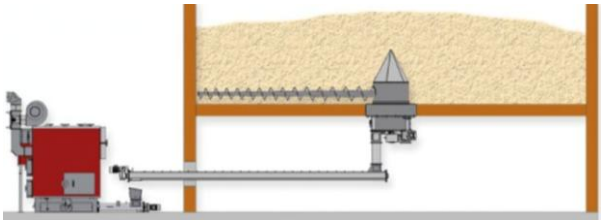


Figure 6.23 Système d'extraction avec vis centrale (source: Binder Energietechnik GmbH, vis d'extraction de silo type SES-E1L de Gottwald GmbH Maschinenbau).

**Vis conique**

La vis conique (Figure 6.24) sert à vider en continu des silos hauts à base circulaire, octogonale ou ronde. La vis conique transporte le combustible vers le dispositif d'extraction situé au centre du silo. Sa structure est similaire à celle de la vis centrale, mais elle n'est pas horizontale, mais inclinée. Son diamètre effectif est compris entre 1,5 m et 5,0 m. La vis conique convient aux silos hauts et aux combustibles secs, à la sciure et à la poussière.

Les principaux avantages de la vis conique sont les suivants:

- Construction simple
- Faible tendance à la formation de ponts
- Hauteur de silo importante possible (à condition de disposer d'ouvertures d'entretien appropriées pour le déblayage).

Parmi les inconvénients, on peut citer :

- Impossible d'utiliser pleinement le volume de stockage, un volume résiduel reste dans le silo
- Surface au sol limitée
- Pièces d'entraînement dans le silo



Figure 6.24 Système d'extraction avec vis conique (source : Schmid energy solutions).

**Vis pendulaire**

La vis pendulaire (Figure 6.25) permet de décharger en continu le bois-énergie provenant de silos carrés et rectangulaires. La vis pendulaire est fixée au bord du silo. Elle oscille horizontalement en demi-cercle dans un secteur limité au fond du silo et transporte le bois-énergie vers le dispositif d'extraction. La vis pendulaire convient à tous les combustibles, à l'exception des écorces non broyées et du bois d'entretien du paysage grossièrement broyé, mais elle est sensible aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux pierres.

Les avantages de la vis sans fin pendulaire sont les suivants:

- Construction simple
- Faible tendance à la formation de ponts
- Grande hauteur de silo possible (à condition de disposer d'ouvertures d'entretien appropriées pour le déblayage)
- Aucune pièce d'entraînement dans l'espace du silo

Les inconvénients sont les suivants :

- Impossible d'utiliser toute la surface au sol, un volume résiduel reste dans le silo
- Sensible aux particules de combustible surdimensionnées et aux pierres (tri nécessaire)

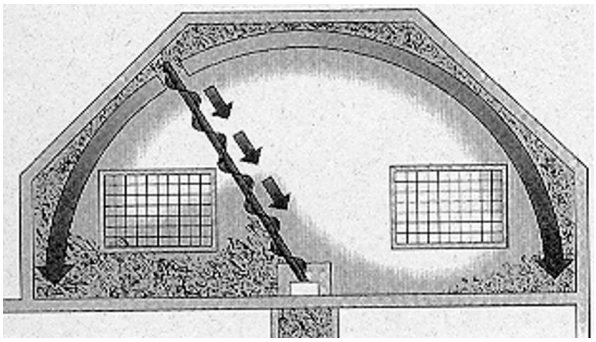


Figure 6.25 Système de extraction avec vis pendulaire [68].

**Vis sans fin**

La vis sans fin (Figure 6.26) est principalement utilisée pour l'extraction des silos ronds et verticaux hors sol. La vis sans fin décrit un cercle autour du centre au fond du silo et transporte le combustible vers le centre du silo avec un diamètre effectif de 2 m à 20 m. Elle convient à tous les combustibles bois d'une taille maximale de 200 mm.

Les avantages de la vis sans fin sont les suivants :

- Construction simple et robuste
- Hauteurs de silo importantes possibles

Les inconvénients de la vis sans fin sont les suivants :

- Formation possible de ponts en fonction de la fluidité du combustible
- Pièces d'entraînement dans le silo
- Sensibilité aux particules de combustible surdimensionnées et aux pierres (tri nécessaire)



Figure 6.26 Vis sans fin (source : JPA Fördertechnik).

## 6.4.2 Systèmes d'extraction spéciaux

Les systèmes d'évacuation spéciaux suivants peuvent être utilisés pour les plaquettes de qualité et les granulés.

**Extraction à bras articulé**

Le système d'évacuation à bras articulé (Figure 6.27) permet de vider en continu les silos carrés et ronds destinés aux plaquettes de bois et aux granulés de qualité. Deux bras articulés décrivent un cercle autour du centre au fond du silo et transportent le combustible horizontalement vers le milieu de la pièce. Le rayon décrit par le bras articulé augmente au fur et à mesure de l'extraction, de sorte que même le combustible situé en périphérie peut être récupéré et déchargé. Le système d'évacuation à bras articulé couvre un diamètre d'environ 6 m, peut gérer une hauteur de déversement de 6 m et peut être utilisé à l'horizontale ou en biais. Il convient à l'évacuation de plaquettes de bois et de granulés de qualité.

Les avantages du système d'extraction à bras articulé sont les suivants :

- Construction simple
- Grande hauteur de stockage possible

Les inconvénients du système d'évacuation à bras articulé sont les suivants :

- Surface au sol utilisable limitée
- Pièces d'entraînement dans l'entrepôt



Figure 6.27 Système d'évacuation avec bras articulé pour plaquettes de qualité et granulés de bois (source : Energie-bois Suisse).

**Extraction à ressort**

Le système d'extraction à ressort (extraction à agitateur à ressorts à lames, Figure 6.28) sert à l'extraction continue de plaquettes de bois et de granulés de qualité à partir de silos carrés et ronds. Deux ou trois bras à ressorts à lames avec entraîneurs transportent le combustible vers le canal ouvert de la vis d'extraction à l'aide du mouvement rotatif de l'agitateur. Le rayon décrit par les bras à ressorts à lames s'agrandit au cours du processus d'extraction, de sorte que même le combustible situé en périphérie peut être récupéré et déchargé. L'extraction s'effectue horizontalement ou en biais vers le haut. Le diamètre effectif est de 6 m maximum, la hauteur de déversement maximale est de 4 m (granulés) ou de 6 m (plaquettes de bois de qualité).

Les avantages du système d'extraction à ressort sont les suivants:

- Construction simple
- Faible formation de ponts

Les inconvénients sont les suivants :

- Surface au sol exploitable limitée
- Pièces d'entraînement dans l'espace de stockage



Figure 6.28 Extraction par ressort (source: Herz).

**Vis centrale avec fond incliné**

La vis centrale avec fond incliné (Figure 6.29) sert à l'évacuation continue des granulés depuis des espaces de stockage rectangulaires. Les granulés sont évacués par une vis qui est posée au centre de l'espace, sur le sol de l'espace de stockage, dans une auge, et dont la longueur s'étend sur tout l'espace de stockage. Un fond incliné à surface lisse garantit que les granulés sont entièrement acheminés vers la vis sans fin. Le fond incliné empêche les granulés de rester sur place et évite la concentration de résidus et de fragments dans le silo. Afin de réduire au maximum la perte de volume de stockage due au fond incliné, ce système d'extraction n'est utilisé que dans des silos à granulés étroits et hauts. Le fond incliné doit présenter une inclinaison > 40 ° et être très stable. Afin que les granulés ne soient pas trop endommagés pendant le transport, la distance entre le silo et la chaudière doit être aussi courte que possible et sans déviation. Les changements de direction peuvent provoquer des dysfonctionnements.

Les avantages de ce système sont les suivants :

- Pas de pièces d'entraînement dans le local de stockage
- Faible consommation d'énergie auxiliaire
- Économique

Les inconvénients sont les suivants :

- Utilisation incomplète du volume de l'espace de stockage (volume utile ≈ 2/3 du volume total)
- Le volume de stockage est limité par la longueur maximale de la vis sans fin et par la hauteur de remplissage maximale autorisée.
- Construction complexe du fond incliné
- Transport uniquement en ligne droite, pas de courbes
- Angle d'inclinaison de transport limité

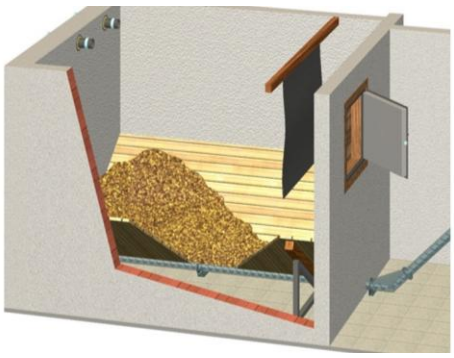


Figure 6.29 Système de extraction de granulés avec fond incliné [68].

**Systèmes d'aspiration pour silos à granulés**

Les systèmes d'aspiration de granulés avec sondes d'aspiration, réparties uniformément sur le sol du silo à granulés, et le système d'extraction type taupe (Figure 6.30) transportent les granulés directement par voie pneumatique du silo à granulés vers la chaudière. Les systèmes d'aspiration pour granulés sont utilisés dans les chaudières à granulés d'une puissance nominale maximale de 300 kW. Ils présentent toutefois l'inconvénient d'une consommation d'énergie accrue pour le transport du combustible, ce qui doit être pris en compte dans le calcul des coûts totaux sur la durée de vie pour une puissance nominale supérieure à 50 kW. Il faut également tenir compte de l'usure des dispositifs de transport par aspiration. En revanche, ces installations sont plus flexibles et polyvalentes en termes de planification du stockage des granulés et de l'emplacement de la chaudière.




Figure 6.30 Taupe à granulés (source : Schellinger KG).

## 6.5 Systèmes de transport

**Convoyeurs à vis**

Le convoyeur à vis (Figure 6.31) permet de transporter le bois-énergie à l'horizontale ou à la verticale. Une vis sans fin simple ou double transporte le combustible dans une auge ouverte ou fermée. À l'extérieur de l'espace de stockage, seuls des systèmes de convoyage fermés doivent être utilisés pour des raisons de sécurité au travail et de protection de la santé. L'entraînement est assuré par un moteur électrique réglable en fonction des besoins. Le convoyeur à vis sans fin est conçu comme une vis sans fin à pales pleines ou à fils métalliques (et non comme une vis sans fin à pales creuses).

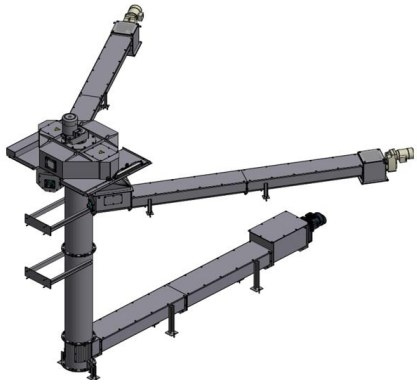


Figure 6.31 Convoyeur à vis sans fin horizontal à vertical (source : Schmid energy solutions).

La taille du diamètre central et le diamètre nominal de la vis sans fin déterminent la taille des morceaux de combustible pouvant être transportés. Le système fonctionne indépendamment de la teneur en eau du combustible et sa conception simple permet une utilisation aisée. Il convient à tous les types de combustible, y compris les granulés, à l'exception des écorces non broyées et du bois de jardinage grossièrement broyé, et il est insensible aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux pierres.

Les avantages du convoyeur à vis sont les suivants :

- Rendement élevé
- Faible encombrement
- Construction simple et économique
- Utilisation simple
- Faible consommation d'énergie électrique

Parmi les inconvénients, on peut citer :

- Quantité limitée de combustible
- Transport uniquement en ligne droite, pas de virages

**Système de poussée**

Le système de poussée (Figure 6.32) permet de transporter le bois-énergie à l'horizontale. Un ou plusieurs vérins hydrauliques déplacent une ou plusieurs barres de poussée avec des traverses vers l'avant et vers l'arrière. Grâce aux entraî-neurs en forme de coin, le combustible est poussé dans la direction souhaitée. Les entraîneurs peuvent être adaptés à la situation locale. Le poids du combustible au-dessus du système de poussée détermine les forces de poussée qui doivent être absorbées par le bâtiment. À l'exception de la sciure et de la poussière, le système de poussée convient à tous les combustibles et est insensible aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux pierres.

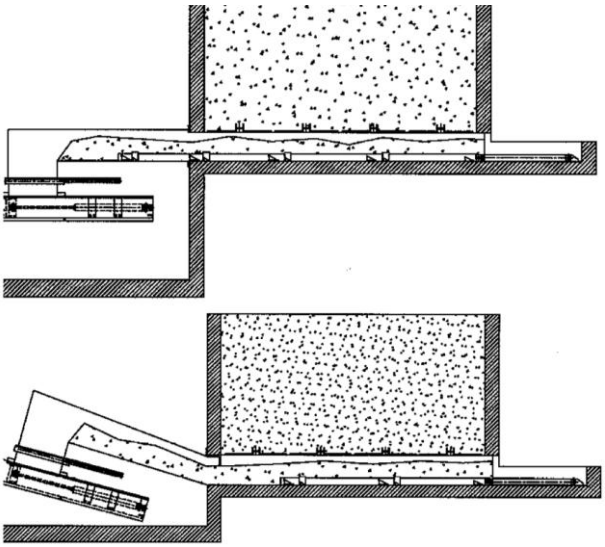


Figure 6.32 Système de poussée à transport horizontal (en haut) et à transport ascendant (en bas) [68].

Ses avantages sont les suivants :

- Grande sécurité de fonctionnement
- Indépendant de la forme, de la taille et de la teneur en eau du bois énergie
- Aucune pièce d'entraînement dans le silo

Ses inconvénients sont les suivants :

- Forces de poussée élevées sur les bâtiments
- Longueur et débit de transport limités
- Utilisation uniquement en ligne droite possible
- Entretien et réparation nécessaires

**Convoyeur à chaîne à raclettes**

Le convoyeur à chaîne à raclettes (Figure 6.33) permet de transporter horizontalement ou verticalement une large gamme de bois énergie. Le convoyeur à chaîne à raclettes fonctionne de manière similaire à un convoyeur à bande. Deux chaînes parallèles circulent dans une structure fermée. Des entraîneurs sont montés entre les deux chaînes et poussent le bois-énergie vers sa destination. Avec les modifications appropriées (différentes ouvertures de déversement), il est également possible de remplir de grands silos et entrepôts. Le convoyeur à chaîne à raclettes est insensible aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux pierres et convient à tous les combustibles à l'exception de la sciure, de la poussière et des granulés.

Ses avantages sont les suivants :

- Capacité de transport élevée
- Possibilités d'utilisation variées

Ses inconvénients sont les suivants :

- Construction complexe
- Coûts d'investissement élevés
- Entretien et réparation nécessaires
- Bruit



Figure 6.33 Convoyeur à chaînes à raclettes [68].

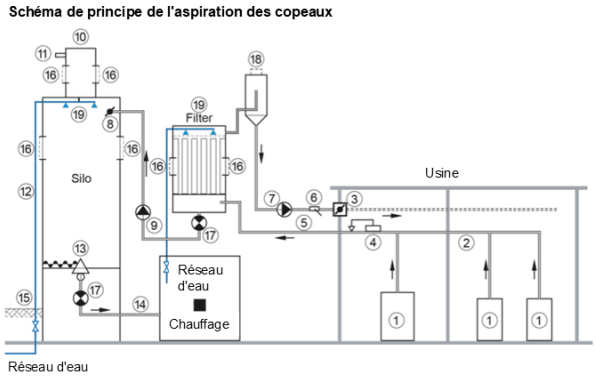
**Transport pneumatique**
Dans le cas du transport pneumatique (Figure 6.34), le bois-énergie est soufflé dans le silo à l'aide d'un flux d'air. Un système de filtration à nettoyage automatique sépare les particules fines de l'air évacué. Dans les systèmes d'aspiration centralisés, un filtre cyclone sépare l'air de transport du bois énergie, qui est en partie recyclé et réutilisé. Le transport pneumatique permet également de franchir de grandes distances horizontales et verticales. Il nécessite toutefois une conception précise en fonction de l'assortiment concret de bois énergie. Le système convient aux plaquettes de bois secs, aux sciures, à la poussière et aux granulés, mais est sensible aux particules de combustible surdimensionnées et aux pierres.

Les avantages du transport pneumatique sont les suivants:

- Bonne adaptation à la configuration du bâtiment
- L'environnement reste exempt de poussière
- Possibilité de franchir de grandes distances horizontales et verticales

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- Limité au bois-énergie sec et en petits morceaux
- Bruyant
- Nécessite des silos supplémentaires
- Risque d'explosion dû à la présence de poussière
- Consommation électrique élevée




Légende :

1 Outils pour le travail du bois
2 Conduite d'aspiration
3 Clapet coupe-feu
4 Détection d'étincelles avec système d'extinction si nécessaire
5 Évacuation de l'air (fonctionnement en été)
6 Clapet inverseur (air retour/air évacué)
7 Ventilateur
8 Clapet anti-retour
9 Ventilateur de refoulement
10 Filtre de séparation finale
11 Air propre évacué (air extrait)
12 Ligne de refoulement
13 Evacuation des copeaux
14 Dispositif de transport vers le chauffage
15 Raccordement au réseau d'eau
16 Réducteur de pression
17 Vanne rotative
18 Cheminée de décharge avec disque de rupture
19 Dispositif d'extinction

Figure 6.34 Transport pneumatique (source : VKF 104-15 Chaudières à plaquettes [70]).

# 6.6 Alimentation du foyer

Le combustible est acheminé vers le foyer via les dispositifs d'alimentation. Dans les installations à plusieurs chaudières, chaque installation dispose de son propre dispositif d'alimentation. En règle générale, l'alimentation s'effectue à l'aide de convoyeurs à vis ou de poussoirs hydrauliques.

**Convoyeurs à vis**
Les convoyeurs à vis ou les vis sans fin (Figure 6.35) permettent une alimentation continue sans compactage du combustible. Il en résulte une occupation régulière, mais limitée à un côté, de la grille de combustion. L'utilisation de convoyeurs à double vis permet d'étendre l'occupation régulière de la grille à toute sa largeur.



Figure 6.35 Alimentation avec convoyeur à vis (source : Schmid energy solutions).

**Poussoirs hydrauliques**
Les poussoirs hydrauliques (Figure 6.36) alimentent le foyer en combustible de manière discontinue. Celui-ci est donc légèrement compacté. Une quantité prédéfinie de combustible est amenée devant le poussoir par un sas, puis poussée lentement et en continu dans le foyer en fonction de la puissance de combustion requise. Les combustibles à forte teneur en matières étrangères (bois usagé) peuvent entraîner une usure accrue du poussoir et du canal d'alimentation.

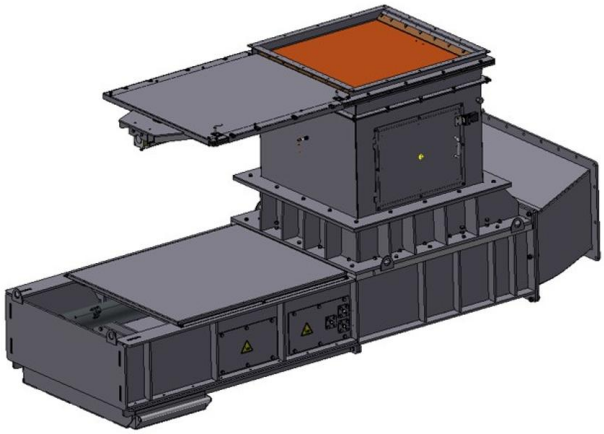


Figure 6.36 Alimentation avec poussoir hydraulique (source : Schmid AG energy solutions).

**Pousseur direct (systèmes d'alimentation par poussée)**
Les poussoirs directs (systèmes à poussoir, Figure 6.37) permettent un compactage important du combustible. Afin que le combustible compacté puisse brûler de manière optimale sur une grille mobile, il doit être préalablement aéré à l'aide de mesures supplémentaires. Le compactage peut également être réduit en aménageant une zone de décompression dans le canal d'alimentation. Afin d'éviter les fluctuations de puissance, le combustible est poussé en continu dans le foyer, en fonction de la puissance de combustion requise.

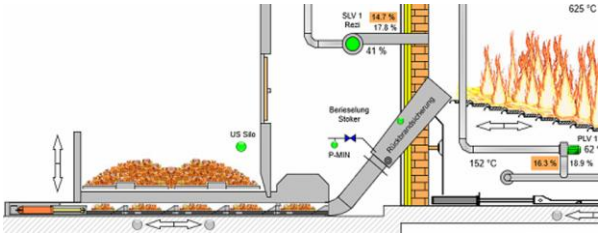



Figure 6.37 Alimentation avec poussoir direct (source: Agro Forst & Energietechnik GmbH).

## 6.7 Dispositif anti-retour de flamme dans le système d'alimentation en combustible

Afin d'empêcher un retour de flamme de la chambre de combustion vers l'alimentation en combustible et le stockage de combustible, les chaudières à bois à alimentation automatique doivent être équipées de dispositifs anti-retours de flamme. Les prescriptions correspondantes varient selon les pays.

**CH et AT:** au moins deux dispositifs indépendants sont obligatoires : un dispositif d'extinction dans l'alimentation en combustible avec déclenchement thermique indépendant de l'alimentation électrique et au moins un autre dispositif indépendant de l'alimentation en eau, tel qu'un dispositif à chute, un tiroir, un clapet anti-retour, une écluse à roue cellulaire ou similaire (Figure 6.38).

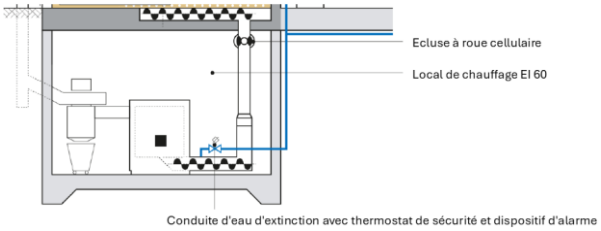



Figure 6.38 Dispositif anti-retour de flamme, chute, écluse à roue cellulaire (source : VKF 104-15 Chaudières à plaquettes [70]).

**DE :** Les installations de chauffage au bois à alimentation mécanique doivent être équipées d'un dispositif de sécurité empêchant les retours de flamme et les projections d'étincelles dans le dispositif d'alimentation ou de dosage ainsi que dans la chaufferie (voir chapitre 19).

**Dispositif d'extinction**
Le dispositif d'extinction permet d'empêcher un retour de flamme en cas de déclenchement par un déclencheur thermique indépendant du courant électrique qui injecte de l'eau du robinet dans le canal de combustion. La vanne d'eau d'extinction et le déclencheur thermique sont compris dans la livraison de la chaudière à bois. Le raccordement de la tuyauterie relève de la responsabilité du planificateur ou de la planificatrice et il convient de veiller à installer un filtre à impuretés.

**Étage de chute**
Une chute (conduit de chute) dans l'alimentation en combustible crée une interruption locale dans le système d'alimentation et empêche ainsi un retour de flamme.

**Vannes et clapets anti-retour**
Les vannes et clapets anti-retour sont installés dans la chute de l'alimentation en combustible. En cas de dépassement d'une température limite réglable, un thermostat déclenche la fermeture et bloque l'alimentation en combustible.

**Sas à roue cellulaire**
La vanne rotative se compose d'une roue à plusieurs ailettes intégrée dans un boîtier métallique et est placée dans la chute. Elle est entraînée par un moteur électrique couplé aux moteurs de transport. À l'arrêt, les ailettes de la roue bloquent le passage du combustible et empêchent ainsi un retour de flamme. Dans le silo à plaquettes sous pression, la vanne rotative sépare le silo du système de transport sans pression.

## 6.8 Décendrage

Les dispositifs mécaniques de transport des cendres comprennent les convoyeurs à vis, les convoyeurs à poussoirs, les convoyeurs à chaînes à raclettes, les convoyeurs à auges, les convoyeurs à godets et les convoyeurs à chaînes à raclettes pour le transport humide (Figure 6.39 jusqu'à Figure 6.41). Ceux-ci transportent toutes les qualités de cendres de la chambre de combustion vers les conteneurs ou les silos à cendres et, à l'exception des vis sans fin, sont capables de parcourir de plus longues distances.

Avantages :

- Faible sensibilité aux pannes
- Insensibilité aux corps étrangers, aux scories et aux particules incandescentes
- Faible consommation d'énergie auxiliaire
- Faibles émissions sonores.

Les principaux inconvénients sont les suivants :

- Encombrement important (inadapté aux espaces restreints)
- Usure élevée en cas de cendres riches en scories ou de cendres contenant une forte proportion de corps étrangers



Figure 6.39 Vis d'évacuation de la chambre de combustion (source : Schmid energy solutions).



Figure 6.40 Évacuation sous la grille, extraction au moyen d'un fond poussant. (Source : Schmid energy solutions).



Figure 6.41 Dispositif mécanique d'évacuation des cendres : avec convoyeur à chaînes à raclettes (source : AEE INTEC)

# 7 Hydraulique de la production de chaleur

## 7.1 Principes hydrauliques

Ce chapitre traite des exigences relatives à l'hydraulique de la production de chaleur. L'hydraulique de la distribution de chaleur n'est pas abordé dans le présent manuel de planification de QM Chauffages au bois. Pour plus d'informations à ce sujet, veuillez vous reporter au Guide de planification Chauffage à distance [19] .

Les exigences détaillées relatives à la conception des solutions hydrauliques et techniques de régulation en matière de production de chaleur sont présentées dans les volumes 2 et 5 de la série de publications QM Chauffages au bois (solutions standards/ QM Holzheizwerke (circuits standard partie I [62] et partie II [71]).

Dans les schémas standards partie I et partie II, la solution hydraulique et technique de régulation est décrite en détail pour chacune des huit variantes de base d'un « système de produc-tion de chaleur avec installation de chauffage au bois » dans un document complet séparé comprenant les sections suivantes :

- Brève description et responsabilité
- Schéma de principe et conception
- Description fonctionnelle
- Enregistrement des données pour l'optimisation du fonctionnement
- Supplément au procès-verbal de réception

Il est recommandé, dans la mesure du possible, de choisir l'un des **circuits standard éprouvés** afin de répondre aux exigences de qualité fondamentales en matière d'hydraulique et de régulation.

En ce qui concerne l'hydraulique de la production de chaleur, cela permet notamment de respecter des principes tels que l'extensibilité de la production de chaleur à une autre chaudière à bois, le découplage strict des circuits hydrauliques à faible différence de pression (bypass/séparateur hydraulique) et le respect des autorités minimales des vannes.

**Calcul simplifié du débit (débit volumique), de la différence de pression (hauteur de refoulement) et de la puissance de la pompe**

Dans le système hydraulique de production de chaleur, les trois questions suivantes se posent souvent pour la conception des circuits de chaudière :

- Quel doit être le débit ?
- Quelle est la différence de pression au niveau de la vanne de régulation pour ce débit ?
- Quelle est la puissance requise de la pompe pour atteindre ce débit ?

Les trois formules simplifiées suivantes répondent généralement à ces questions avec une précision suffisante.

Débit :

$$\dot{V}\left[\frac{m^3}{h}\right] = 0.86\ \frac{\dot{Q}\ [kW]}{\Delta T\ [K]}$$

Différence de pression :

$$\Delta p\ [kPa] = 100\left(\frac{\dot{V}\left[\frac{m^3}{h}\right]}{k_V\left[\frac{m^3}{h}\right]}\right)^2$$

Puissance de la pompe :

$$P_{Pumpe}\ [kW] = 0.86\ \frac{\Delta p\ [kPa]\ \dot{V}\left[\frac{m^3}{h}\right]}{3600\ \eta_{Pumpe}\ [-]}$$

| | |
|---|---|
| $\dot{V}$ | Débit en m³ /h |
| $\dot{Q}$ | Puissance thermique en kW |
| $\Delta T$ | Différence de température en K |
| $\Delta p$ | Différence de pression en kPa |
| $k_V$ | Facteur de débit en m³ /h |
| $P_{pompe}$ | Puissance absorbée de la pompe en kW |
| $\eta_{pompe}$ | Rendement de la pompe |

**Remarque importante :**
Ces formules s'appliquent approximativement à l'eau entre 5 °C et 95 °C. Il s'agit d'équations numériques dans lesquelles les grandeurs doivent être utilisées dans les unités prescrites. Le facteur 0,86 correspond au produit de la densité [kg/m³] et de la capacité thermique [kWh/(kg*K)].

## 7.2 Régulation du circuit de chaudière

Afin de limiter la corrosion des parois des conduits d'évacuation des fumées, les fabricants de chaudières prescrivent une température minimale d'entrée de l'eau dans la chaudière (voir chapitre 5.4). Cette température minimale d'entrée dans la chaudière est garantie par un mélange approprié du départ et du retour via un circuit de mélange hydraulique dans le circuit de la chaudière à l'aide d'une vanne à trois voies. Afin de garantir une température de sortie de chaudière constante, celle-ci est également régulée indirectement via la vanne à trois voies en augmentant ou en diminuant la température d'entrée dans la chaudière. Les principes de base de la conception de la vanne de régulation dans le circuit de mélange sont présentés ci-dessous.

### 7.2.1 Vanne de régulation du circuit de chaudière

Dans le circuit de chaudière, on utilise généralement des vannes à trois voies avec deux entrées et une sortie, appelées vannes mélangeuses (voir Figure 7.1).

Le comportement hydraulique des vannes de régulation est décrit par la courbe caractéristique de base. Celle-ci représente la course en fonction du débit. Les vannes à trois voies sont généralement proposées avec deux courbes caractéristiques de base différentes :

- **Courbe caractéristique de base linéaire** : des variations de course identiques entraînent des variations de débit identiques (application: circuit de régulation sans échangeur thermique).
- **Courbe caractéristique à pourcentage constant** : des variations de course identiques entraînent une variation proportionnellement identique du débit actuel (application: circuit de régulation avec échangeur de chaleur).

Vous trouverez de plus amples informations sur les vannes de régulation dans le Guide de planification Chauffage à distance ([19], chapitre 8.4.4).

Les fabricants indiquent un facteur de débit (**valeur $k_{VS}$**) pour chaque vanne de régulation. Cela permet de calculer la chute de pression sur la vanne de régulation entièrement ouverte à 100 % du débit à l'aide de la formule de différence de pression suivante :

$$\Delta p_{V,100}\ [\text{kPa}] = 100 \left( \frac{\dot{V}_{100}\ \left[\frac{m^3}{h}\right]}{k_{VS}\ \left[\frac{m^3}{h}\right]} \right)^2$$

| | |
|---|---|
| $\Delta p_{V,100}$ | Chute de pression au niveau de la vanne à un débit de 100 % |
| $\Delta p_{V,0}$ | Chute de pression à travers la vanne à un débit de 0 % lorsque celle-ci commence à s'ouvrir |
| $\Delta p_{var,100}$ | Chute de pression sur le trajet représenté en vert avec un débit variable (Figure 7.1) |

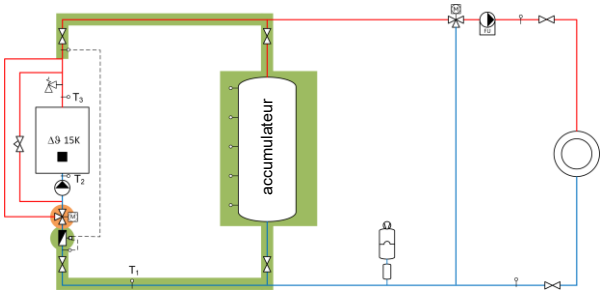



Figure 7.1 Circuit de chaudière avec débit constant et section à débit variable en vert.

Pour le dimensionnement de la vanne de régulation du maintien du retour, le tronçon à débit variable est déterminant (voir tronçon marqué en vert dans Figure 7.1). La différence de pression du tronçon à débit variable doit être aussi faible que possible. La pompe dans le circuit de chaudière fonctionne à débit constant, ce qui permet de réguler la température. Cela signifie que la vanne de régulation permet de réguler la température d'entrée de la chaudière afin de maintenir une température de sortie constante dans la chaudière à débit constant. Les formules suivantes permettent de déterminer le débit de la vanne et de la pompe ainsi que l'autorité de la vanne (VA) dans le circuit de la chaudière.

Débit de la vanne :

$$\dot{V}_V\ \left[\frac{m^3}{h}\right] = 0.86\ \frac{\dot{Q}\ [\text{kW}]}{T_3 - T_1\ [\text{K}]}$$

Débit de la pompe :

$$\dot{V}_P\ \left[\frac{m^3}{h}\right] = 0.86\ \frac{\dot{Q}\ [\text{kW}]}{T_3 - T_2\ [\text{K}]}$$

Autorité de la vanne :

$$VA = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,100} + \Delta p_{var,100}}$$

| | |
|---|---|
| $\dot{V}_P$ | Débit en m³ /h |
| $\dot{V}_V$ | Débit en m³ /h |
| VA | Autorité de la vanne |
| $\dot{Q}$ | Puissance thermique en kW |
| $T_{1..3}$ | Température au point de mesure 1 à 3 en °C selon la Figure 7.1 |
| $\Delta p_{V,100}$ | Chute de pression au niveau de la vanne à 100 % du débit |
| $\Delta p_{var,100}$ | Chute de pression sur la section marquée en vert avec débit variable (Figure 7.1) |

**Remarque importante :**
Ces formules s'appliquent approximativement à l'eau entre 5 °C et 95 °C. Il s'agit d'équations numériques dans lesquelles les grandeurs doivent être utilisées dans les unités prescrites. Le facteur 0,86 correspond au produit de la densité [kg/m³] et de la capacité thermique [kWh/(kg*K)].

**Autorité de la vanne**

Lorsqu'une vanne est intégrée dans un circuit hydraulique, elle ne se comporte plus conformément à la courbe caractéristique de base, car la différence de pression au niveau de la vanne devient une partie variable de la chute de pression totale de l'installation. Il en résulte une déformation plus ou moins importante de la courbe caractéristique de base. Plus la déformation augmente, plus la précision et la vitesse de la régulation sont affectées et, dans les cas extrêmes, le circuit de régulation devient instable et commence à osciller.

L'autorité de la vanne est utilisée comme mesure de la déformation de la courbe caractéristique de base. La formule de calcul de l'autorité de la vanne (VA) est indiquée ci-dessus. La chute de pression sur la partie du circuit hydraulique dont le débit variable est influencé par la vanne joue ici un rôle important (voir Figure 7.1, section marquée en vert).

Les circuits hydrauliques équipés de vannes à trois voies ne présentent aucun problème de stabilité tant que la règle suivante est respectée :

$$VA = \frac{\Delta p_{V,100}}{\Delta p_{V,100} + \Delta p_{var,100}} \geq 0.5$$

(Valeur cible, valeur limite dans des cas exceptionnels VA ≥ 0,3)

Il en résulte : $\Delta p_{V,100} \geq \Delta p_{var,100}$

À un débit de 100 %, la chute de pression sur la vanne à trois voies ouverte ($\Delta p_{V,100}$) doit être égale ou supérieure à la chute de pression sur le trajet à débit variable ($\Delta p_{var,100}$).

Souvent, **plusieurs circuits de chaudière** sont raccordés **en mélange** avec une faible différence de pression

(par exemple à un accumulateur thermique). Chaque pompe de chaudière prélève ainsi son volume d'eau via sa vanne et la section à débit variable (voir Figure 7.2). Cela soulève une autre question: *« Quelle est la différence de pression maximale admissible sur la section à débit variable ? »* En effet, si cette différence de pression devient trop importante, les différents circuits de chaudière s'influencent mutuellement. Cela peut entraîner une réduction du débit d'une pompe de chaudière dont la hauteur de refoulement est trop faible et empêcher la chaudière correspondante de fournir sa puissance nominale. Pour éviter cela, il convient de respecter la règle suivante en plus de la règle relative à l'autorité de la vanne.

**Plusieurs circuits de chaudière en circuit mixte**

Si plusieurs circuits de chaudière à faible différence de pression sont raccordés en circuit mixte (par exemple à un accumulateur de chaleur), la différence de pression maximale sur le trajet à débit variable ne doit pas dépasser 20 % de la hauteur de refoulement de la plus petite pompe de chaudière au point de conception (voir Figure 7.2).

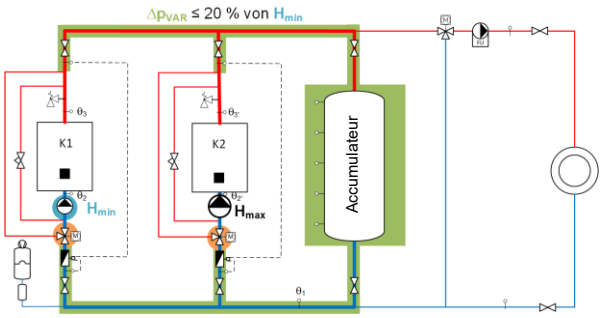



Figure 7.2 Circuits de chaudière à débit constant dans les installations à plusieurs chaudières. La chaudière 1 est influencée, voire considérablement réduite, lors du fonctionnement en parallèle des deux chaudières à leur puissance nominale.

## 7.2.2 Bypass dans circuit de chaudière

Dans un circuit hydraulique correctement dimensionné, la vanne de régulation fonctionne de manière relativement linéaire. Un débit de 50 % correspond à une course de 50 %, un débit de 100 % correspond à une course de 100 %.

Si la plage de régulation de la vanne de régulation sans dérivation dans le circuit de chaudière est fortement limitée par des niveaux de température différents entre la température de retour principal et la température d'entrée de la chaudière, cela peut entraîner une régulation imprécise, voire une oscillation du circuit de régulation.

Un bypass dans le circuit de la chaudière permet d'élargir considérablement la plage de régulation de la vanne de régulation malgré les différences de température entre le retour principal et l'entrée de la chaudière (voir Figure 7.3).

Les dérivations sont généralement utiles

- Si la différence de température entre la température de sortie et la température d'entrée de la chaudière (T_12 – T_11 dans Figure 7.3) est inférieure de plus de 10 K à la différence de température entre la température de sortie de la chaudière et la température de retour principale maximale admissible (T12_ - T_43 dans Figure 7.3). La vanne de régulation peut ainsi être dimensionnée plus petite et sa plage de régulation peut être pleinement exploitée.
- Si l'on s'assure que la température de retour principale T_43 ne peut en aucun cas dépasser la valeur de conception. C'est la seule façon de garantir que la chaudière puisse fournir sa puissance nominale dans tous les cas.

Le débit volumique de la dérivation est dimensionné comme suit : à la puissance nominale et à la température de retour principale maximale, le débit volumique via la dérivation de la vanne mélangeuse doit être proche de zéro. La position de la vanne est réglée sur un passage à 100 %.

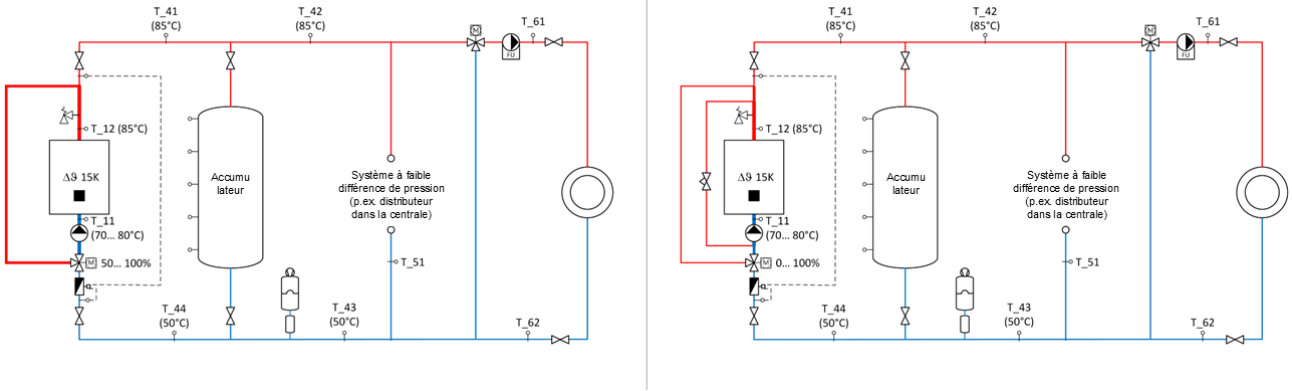



Figure 7.3 Intégration hydraulique du circuit de chaudière sans et avec dérivation.

## 7.3 Pompes

### 7.3.1 Types de pompes

On distingue généralement :

- Pompe à moteur à sec : la pompe est reliée à un moteur normalisé par un arbre et un accouplement.
  - Dans le cas d'une pompe sur socle, le moteur normalisé et la pompe sont montés sur un socle.
  - Dans le cas d'une pompe en ligne, le moteur normalisé est monté sur une pompe tubulaire.
- Pompe à rotor noyé : la pompe tubulaire et le moteur à gaine forment une unité. Le fluide pompé lubrifie les paliers et refroidit le moteur. L'entraînement est assuré par un moteur synchrone à courant continu à vitesse variable avec rotor à aimant permanent. Le domaine d'application actuel est d'un débit maximal de 80 m³ /h.

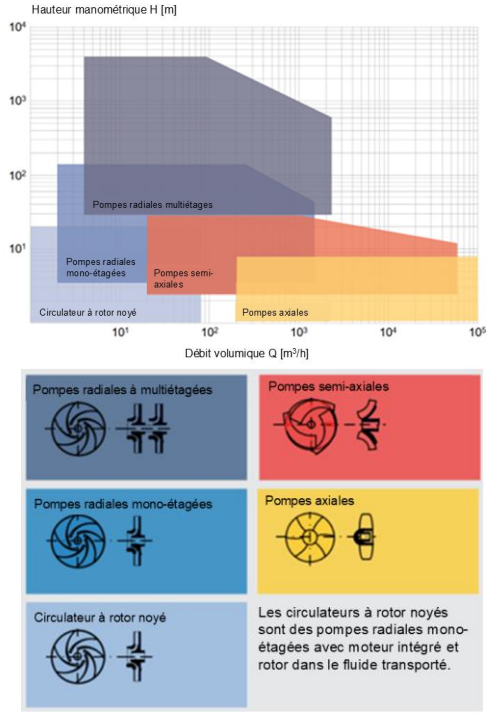



Figure 7.4 Typologie des pompes en fonction de la hauteur de refoulement et du débit volumique. Graphique propre basé sur [72].

**Les pompes de chaudière à vitesse** variable sont disponibles dans les versions suivantes :

- Pompe à rotor noyé avec moteur synchrone à courant continu à régulation continue de la vitesse
- Pompe à moteur à sec avec moteur normalisé (pompe en ligne ou sur socle) et convertisseur de fréquence externe
- Pompe à moteur à sec avec moteur normalisé (pompe en ligne ou sur socle) et convertisseur de fréquence intégré

### 7.3.2 Conception des pompes

L'utilisation des programmes de dimensionnement des pompes proposés par les fabricants permet de comparer différentes pompes pour un domaine d'application donné (débit, hauteur de refoulement) en termes d'efficacité énergétique et de coûts sur la durée de vie.

Les données spécifiques au produit du programme de dimensionnement (courbe caractéristique de la pompe, rendement global [rendement de la pompe plus rendement du moteur], rendement de la pompe) fournies par le fabricant permettent de faire un choix optimal.

Afin de pouvoir vérifier ou comparer les données spécifiques au produit du programme de dimensionnement, il convient de tenir compte des principes fondamentaux suivants de la technologie des pompes :

**Courbe caractéristique de la pompe**
La courbe caractéristique de la pompe indique la hauteur de refoulement (différence de pression) en fonction du débit volumique (débit). On distingue les courbes caractéristiques plates des pompes à faible vitesse et les courbes caractéristiques raides des pompes à vitesse élevée (voir Figure 7.5). Les pompes de chaudière ont des courbes caractéristiques plates, les pompes de refoulement ont des courbes caractéristiques raides.

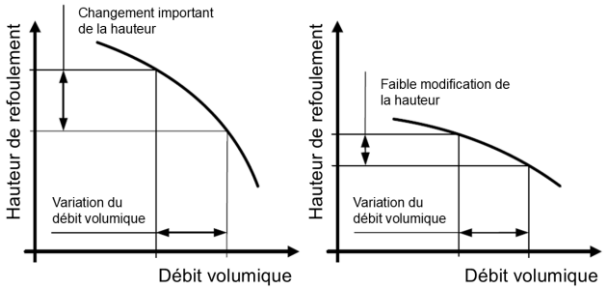



Figure 7.5 Courbe caractéristique raide (à gauche) et plate (à droite) d'une pompe.

**Courbe caractéristique de l'installation**
La perte de pression du réseau de chaleur augmente proportionnellement au carré du débit volumique. Cette relation entre la hauteur de refoulement et le débit volumique est représentée dans la courbe caractéristique de l'installation. Comme la courbe caractéristique de la pompe présente la même relation entre la hauteur de refoulement et le débit volumique, les deux courbes caractéristiques peuvent être représentées dans le même système de coordonnées (Figure 7.6). Elles ont un point d'intersection commun. Il s'agit du point de fonctionnement de la pompe, auquel la hauteur de refoulement de la pompe correspond à la perte de pression de l'installation.

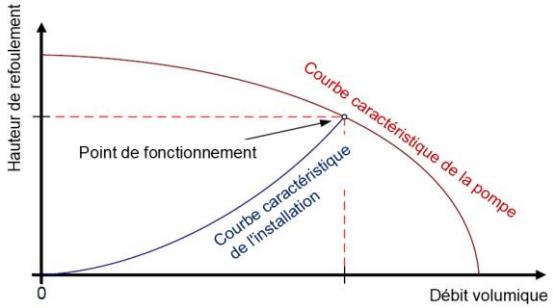



Figure 7.6 Courbes caractéristiques de la pompe et de l'installation [19].

Lois de proportionnalité

Lorsque la vitesse de rotation d'une pompe de circulation est modifiée, la hauteur de refoulement, le débit volumique et la puissance hydraulique se comportent conformément aux trois lois de proportionnalité suivantes.

Le débit volumique est proportionnel à la vitesse de rotation de la pompe :

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

La hauteur de refoulement (différence de pression) varie avec le carré de la vitesse de rotation :

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

La puissance hydraulique de la pompe varie avec le cube de la vitesse de rotation :

$$\frac{P_{hydr1}}{P_{hydr2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

À demi-vitesse, le débit volumique diminue donc de moitié, la hauteur de refoulement, c'est-à-dire la chute de pression, diminue d'un quart et la puissance requise par la pompe d'un huitième.

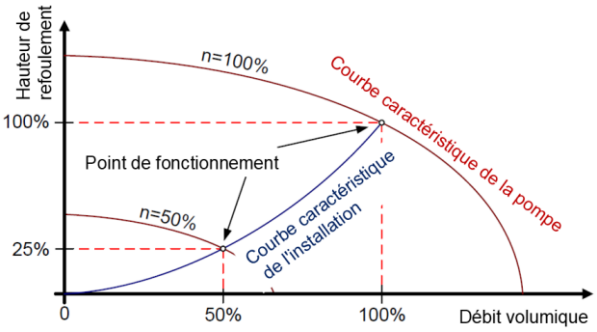



Figure 7.7 Courbe caractéristique de la pompe et de l'installation pour deux vitesses de rotation différentes [19].

**Consommation électrique de la pompe, rendement de la pompe, efficacité énergétique**

Le choix d'une pompe de circulation est une question de conception hydraulique. La consommation électrique de la pompe doit également être prise en compte dès le début. À cet effet, la classe d'efficacité énergétique requise pour le moteur électrique des pompes à moteur à sec et les valeurs limites de l'indice d'efficacité énergétique (EEI) pour les pompes à moteur à eau doivent être respectées (voir également le manuel de planification du chauffage à distance [19] chapitre 3.3.2).

**Que faut-il prendre en compte ?**

- Éviter les débits volumétriques inutilement élevés
- Courbe caractéristique du réseau aussi plate que possible
- La position du point de fonctionnement dans le diagramme de la pompe a une influence décisive sur le rendement. Le rendement optimal se situe généralement dans le tiers central de la courbe caractéristique pour le régime maximal, mais il existe des exceptions.
- N'utiliser les pompes à vitesse variable que dans les circuits de chaudière à débit très variable (voir chapitre 7.3.3). Il faut également veiller à ce que le point de fonctionnement ne soit pas trop éloigné du tiers central de la courbe caractéristique pour le régime maximal.
- Pour les pompes à vitesse variable, il convient d'utiliser si possible des pompes à rotor noyé avec des moteurs synchrones à courant continu à rotor à aimant permanent.

## 7.3.3 Pompe de chaudière à vitesse variable

En règle générale, le circuit interne des chaudières à bois fonctionne à un débit constant, conformément aux spécifications des solutions standards. Cela facilite la régulation de l'installation, car seule la vanne à trois voies est commandée et une pompe de chaudière à vitesse variable n'est pas nécessaire. Une pompe de chaudière à un étage, dimensionnée de manière optimale, répond aux exigences d'un fonctionnement économe en énergie. Les pompes à rotor noyé avec moteur synchrone à courant continu à vitesse variable doivent être utilisées à un point de fonctionnement fixe en termes de débit et de hauteur de refoulement, c'est-à-dire à vitesse constante.

L'utilisation d'une pompe de chaudière à vitesse variable est motivée par la réduction de la consommation électrique nécessaire au fonctionnement de la pompe. Une pompe de chaudière à vitesse variable est utilisée dans les applications suivantes :

- **Approche réglementaire pour la spécification indirecte de la puissance via la température de consigne (à la sortie) de la chaudière (circuit de chaudière avec vanne à trois voies pour augmenter le retour à une température d'entrée constante dans la chaudière) :**
  Il s'agit ici d'une spécification de puissance indirecte pour la chaudière à bois via la vitesse de consigne de la pompe de chaudière à température d'entrée de chaudière constante. La valeur de consigne de la puissance de la chaudière est spécifiée indirectement par le régulateur via la température de l'eau de chaudière. Celui-ci régule à une température de sortie de chaudière de consigne constante.

  En raison de l'inertie de la consigne de puissance indirecte, cette approche de régulation n'est pas efficace en cas d'utilisation d'un accumulateur de chaleur avec consigne directe de la puissance de combustion par la régulation en raison de l'état de charge de l'accumulateur.
- **Approche de régulation pour une différence de température constante dans le circuit de la chaudière (température de sortie de la chaudière moins température d'entrée de la chaudière) (circuit de chaudière avec vanne à trois voies pour l'élévation du retour à une température d'entrée de chaudière constante) :**
  Conformément à la valeur de consigne de la puissance de la chaudière, la vitesse de la pompe de la chaudière est régulée de manière à ce que la température de

sortie de la chaudière, la température d'entrée de la chaudière et leur différence restent constantes.

Les phases de fonctionnement suivantes posent des problèmes: démarrage de la chaudière, combustion et veille, pendant lesquelles il est pratiquement impossible de maintenir la température de sortie de la chaudière à un niveau constant. Le comportement de régulation peut en outre être détérioré par une stratification de l'eau de la chaudière en cas de faible débit ou de charge partielle.

Approche de régulation simplifiée: la vitesse de rotation de la pompe de chaudière est directement déterminée en fonction de la valeur de consigne de la puissance de la chaudière. La plage de vitesse requise doit être définie ou réglée lors de la mise en service. La température de sortie de la chaudière peut toutefois présenter des écarts importants et indésirables si, en cas de variation de la qualité du combustible, la puissance de la chaudière ne correspond plus à la puissance de consigne.

- **Approche de régulation pour un circuit de chaudière sans élévation du retour (circuit de chaudière sans vanne à trois voies) :**
  Les chaudières à bois de faible puissance peuvent présenter des constructions qui ne nécessitent pas de limitation de la température d'entrée de la chaudière vers le bas ou pour lesquelles aucune augmentation de la température d'entrée de la chaudière n'est nécessaire.

  La vitesse de la pompe de la chaudière est régulée de manière à maintenir la température de sortie de la chaudière constante sur toute la plage de puissance (par exemple de 50 % à 100 %), indépendamment de la puissance spécifiée de la chaudière. La chaudière est alimentée en conséquence avec un débit variable à une température d'entrée variable.

  Ici aussi, la précision de régulation de la température de sortie de la chaudière est limitée par une stratification indésirable de l'eau de la chaudière en cas de faible débit ou de charge partielle.

Comme le montrent les explications ci-dessus, l'utilisation de pompes à vitesse variable dans le circuit d'une chaudière à bois est complexe. Les écarts de température à la sortie de la chaudière perturbent la stratification de la température dans l'accumulateur de chaleur et peuvent ainsi entraîner un comportement de régulation défavorable de l'installation. C'est pourquoi ces approches de régulation ne figurent pas dans les solutions standards.

Les exigences supplémentaires suivantes en matière de régulation peuvent être nécessaires dans certains cas :

- Les phases de fonctionnement démarrage, combustion et veille nécessitent des fonctions de régulation ou de commande supplémentaires, en particulier pour les chaudières à bois dotées d'un revêtement de chambre de combustion lourd et d'une inertie élevée.
- Lors de l'utilisation d'une chaudière à bois avec une qualité de combustible variable, une température de sortie constante de la chaudière ne peut être obtenue qu'avec des boucles de régulation supplémentaires (par exemple en tenant compte de la puissance thermique moyenne instantanée au compteur de chaleur et du temps mort du volume d'eau de la chaudière).

### 7.3.4 Sécurité de fonctionnement et redondance de la pompe de chaudière

Dans les systèmes d'eau chaude avec une température maximale de l'eau de chauffage inférieure à 110 °C, il est possible de se passer d'une pompe de chaudière de rechange raccordée en parallèle sur le plan hydraulique si la pompe de chaudière peut être remplacée rapidement en cas de besoin. Si une pompe de rechange n'est pas disponible à court terme, il convient d'envisager d'en garder une en stock. **Remarque**: en cas de stockage prolongé, il est possible que la pompe ne corresponde plus à l'état actuel de la technique.

Pour les systèmes à eau chaude avec une température maximale de l'eau de chauffage supérieure à 110 °C, les prescriptions techniques de sécurité (normes, réglementations légales, voir chapitre 19) déterminent si une pompe de chaudière de remplacement raccordée en parallèle sur le plan hydraulique est nécessaire ou non.

## 7.4 Compteurs de chaleur

Les compteurs de chaleur sont installés afin de mesurer la quantité de chaleur produite ou consommée. Ils permettent en outre d'enregistrer les données d'exploitation nécessaires relatives à la puissance thermique actuelle pour la surveillance et l'optimisation de l'exploitation, comme l'exigent les solutions standard. Dans le cadre d'un contrôle qualité selon QM Chauffages au bois, l'installation de compteurs de chaleur est obligatoire.

L'installation de compteurs de chaleur dans une centrale de chauffage doit être prévue aux endroits suivants :

- Dans le circuit de production de chaleur de chaque générateur de chaleur individuel (chaudière à bois, économiseur, condensation des gaz d'échappement, pompe à chaleur, etc.)
- Dans chaque groupe de transport individuel pour enregistrer la quantité de chaleur injectée dans le réseau et ses pertes de distribution de chaleur, ainsi que pour enregistrer les pics de charge ou les baisses de charge au cours de la journée.
- Dans le circuit des chaudières à gaz et à mazout, il est recommandé d'installer un compteur de chaleur. Si cela n'est pas possible, les chaudières doivent impérativement être équipées d'un compteur d'heures de fonctionnement et d'un compteur de mazout/gaz (dans le cas d'un brûleur modulant, le compteur de mazout/gaz doit enregistrer en continu le débit volumique actuel).

Pour la facturation des livraisons de combustible ou de la chaleur achetée par un consommateur de chaleur, l'utilisation de compteurs de chaleur étalonnés est nécessaire. La mesure de la chaleur nécessite une mesure du débit et une mesure de la différence de température entre le départ et le retour.

### 7.4.1 Caractéristiques des compteurs de chaleur

La **classe de précision** d'un compteur de chaleur est déterminée par la précision de mesure du débit et de la différence de température.

**La plage de mesure du débit** est donnée par la plage de fonctionnement entre le débit nominal $q_p$ et le débit minimal $q_i$. Le rapport entre le débit nominal et le débit minimal est une mesure de la plage de débit dans laquelle une certaine précision de la mesure du débit volumique est garantie. La Figure 7.8 montre la courbe d'erreur d'un compteur à roue à ailettes, et la Figure 7.9 montre la courbe d'erreur de la méthode de mesure du débit par jet oscillant.

La **chute de pression au débit nominal $q_p$** est souvent très élevée (20 à 25 kPa pour les compteurs à ailettes). Une chute de pression élevée augmente certes la plage de travail et la précision de mesure, mais elle détériore également l'autorité de la vanne de régulation (voir chapitre 7.2.1), qui se trouve souvent dans la même section de débit (débit volumique variable du circuit de chaudière).

**La qualité de l'eau** a une grande influence sur la précision de mesure en cas d'utilisation prolongée.

Les méthodes de mesure suivantes sont utilisées pour mesurer le débit :

- Mesure magnéto-inductive du débit (MID)
- Mesure du débit par ultrasons
- Mesure du débit selon le principe du jet oscillant
- Mesure mécanique du débit à l'aide d'une roue à ailettes ou d'une turbine

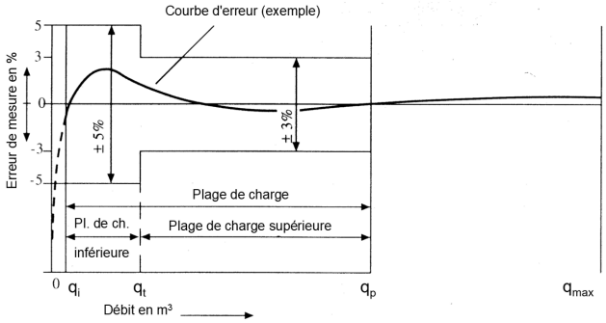



Figure 7.8 Courbe d'erreur de la méthode de mesure mécanique du débit avec roue à ailettes.

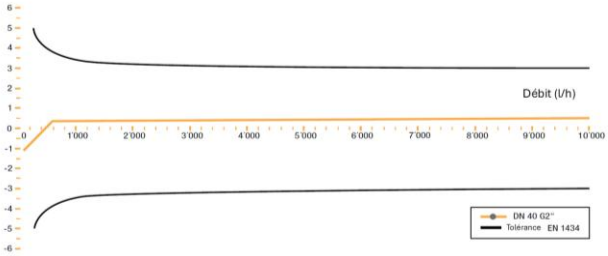



Figure 7.9 Courbe d'erreur de la méthode de mesure du débit par jet oscillant (source: NeoVac Superstatic 440).

Le Tableau 7.1 présente un aperçu des différentes méthodes de mesure du débit. Les méthodes de mesure du débit MID, à ultrasons et à jet oscillant offrent une plus grande précision de mesure que les méthodes mécaniques (à ailettes ou à turbine) (voir également la Figure 7.8 et la Figure 7.9).

Tableau 7.1 Aperçu des principales méthodes de mesure du débit.

| Caractéristique | MID[1)] | Ultrasons | Jet oscillant | Mécanique |
|---|---|---|---|---|
| Rapport $q_p$ /$q_i$ | 100 - 150 | 100 - 150 | 25 - 100 | 25 - 100 |
| Chute de pression au débit nominal $q_p$ en kPa | 7 - 15 | 7 - 20 | 9 - 25 | 10 - 15 |
| Précision de mesure | élevée | élevée | élevée | moyenne |
| Sensibilité de la précision de mesure à la qualité de l'eau | élevée | faible à moyenne[2)] | faible | faible |
| Usure/coûts d'entretien | faible | faible | faible | élevée |
| Sensibilité de la précision de mesure aux champs parasites électriques | élevée | faible | faible | Faible à modérée[3)] |

[1)] Débitmètre magnéto-inductif

[2)] Encrassement des miroirs de renvoi pour les petits diamètres nominaux

[3)] avec générateur d'impulsions inductif

### 7.4.2 Exigences relatives aux différentes méthodes de mesure du débit

Il convient de respecter systématiquement les consignes d'installation du fournisseur du compteur de chaleur et la qualité d'eau requise.

**Débitmètres magnéto-inductifs**

- L'eau ne doit pas contenir de magnétite, car celle-ci se dépose sur les sondes de mesure et influence considérablement la mesure (réduction de la valeur de débit mesurée). La magnétite se forme lors de l'oxydation de l'oxygène contenu dans l'eau avec les molécules de fer des parois des conduites.

- Dans les installations existantes, la qualité d'eau requise (eau claire) peut être obtenue à l'aide d'un séparateur de boues magnétiques associé à un appareil de dégazage.
- Dans les nouvelles installations, il faut veiller à ce que l'eau du système de chauffage soit suffisamment dégazée dès le départ afin que la teneur en oxygène de l'eau soit réduite à zéro.
- En cas d'erreurs de mesure importantes, il est recommandé de nettoyer les parois intérieures des débitmètres. Cela ne résout toutefois pas la cause du problème (eau sale).
- Afin de garantir une vitesse d'écoulement optimale, le compteur de chaleur doit être correctement dimensionné dans la plage de régulation du débit minimal et maximal (fonctionnement à charge partielle et à pleine charge).
- Comme les sondes de mesure sont soumises à une très faible tension (quelques millivolts), le procédé de mesure est sensible aux champs électriques parasites. C'est notamment le cas des appareils split, où le capteur et le convertisseur de mesure sont reliés par des câbles sensibles aux perturbations. Ce problème peut être atténué en utilisant des débitmètres compacts.
- Il est recommandé d'utiliser uniquement des câbles blindés et torsadés et d'éviter la proximité de champs magnétiques puissants provenant de moteurs électriques ou de convertisseurs de fréquence.

**Débitmètres à ultrasons**

- L'encrassement des miroirs de renvoi dans les petits diamètres nominaux et les inclusions de gaz dans l'eau peuvent entraîner des imprécisions de mesure.
- Pour éviter ces perturbations, il faut une eau de haute qualité et un dégazage suffisant de l'eau, ce qui empêche les dépôts sur les miroirs de déviation.

**Débitmètres à jet oscillant**

- Les débitmètres à jet oscillant sont en principe insensibles à l'encrassement, car seul un courant partiel à vitesse d'écoulement élevée est nécessaire pour la mesure.
- En cas d'installation horizontale, il faut veiller à ce que la tête de mesure soit montée sur le côté (et non en bas ou en haut). En cas d'installation verticale, aucune mesure particulière n'est à respecter.

**Débitmètres mécaniques**

- L'installation d'un filtre à impuretés avant l'entrée d'eau du débitmètre permet d'éviter d'endommager ou d'obstruer la roue à aubes ou la turbine.
- Une révision régulière permet d'exclure les phénomènes d'usure mécanique comme source d'erreur.
- Une conception soignée doit garantir que le débit de service ne tombe pas, ou seulement dans de rares cas exceptionnels, en dessous du débit minimal $q_i$.

### 7.4.3 Installation d'un compteur de chaleur

Afin d'obtenir la précision de mesure requise pour le décompte de la chaleur, il convient de respecter les consignes suivantes :

- Respecter les instructions d'installation du fournisseur du compteur de chaleur (section d'entrée, section de sortie, disposition horizontale/verticale, installation du capteur, etc.)
- Les sections d'entrée et de sortie droites varient en fonction du diamètre nominal et de la technologie. La fiche de travail AGFW FW 218 « [73] » (Raccords de tuyauterie pour les installations de gaz) recommande une section d'entrée de 5 x DN et une section de sortie de 3 x DN. Ces tronçons de stabilisation (tronçons d'entrée/de sortie) ne doivent comporter aucun élément intégré tel que des sondes, des doigts de gant, des vannes, des filtres, des coudes, des changements de section ou tout autre élément similaire (voir Figure 7.10).
- La sonde de température pour le retour doit être placée dans le sens d'écoulement après le débitmètre.
- Le débitmètre doit être placé si possible entre deux dispositifs d'arrêt. Cela facilite les travaux d'entretien et le remplacement du compteur conformément au cycle d'étalonnage.
- Conception pour une différence de température > 20 K. Différence de température en fonctionnement d'au moins 3 K, ce qui signifie que l'installation d'un compteur de chaleur dans le circuit constant de la chaudière n'est pas autorisée.
- Répartition uniforme de la température sur la section transversale du tuyau devant les capteurs de température (si nécessaire, installation supplémentaire d'un mélangeur statique).
- Circuits de régulation stables ; les régulateurs oscillants (petite/grande différence de température ou même différence de température positive/négative) peuvent entraîner des erreurs de mesure considérables.
- Empêcher les circulations incorrectes (y compris la circulation monotube) qui peuvent influencer la mesure de la chaleur.
- Si la mesure de la différence de température est effectuée au même niveau que la mesure du débit, les perturbations dues à des circulations incorrectes indésirables peuvent être minimisées (la circulation incorrecte est au moins mesurée correctement).
- Utiliser le compteur de chaleur uniquement dans la plage de débit admissible $q_p$ à $q_i$
- Les compteurs de chaleur compacts présentent l'avantage d'exclure pratiquement toute perturbation de la transmission du signal entre le capteur, le convertisseur de mesure et l'unité de calcul.
- Mise en service techniquement irréprochable des compteurs de chaleur et, si nécessaire, recherche systématique des sources de perturbation par des spécialistes
- Il n'est pas permis de rallonger les câbles des sondes. Les compteurs de chaleur sont calibrés et étalonnés, sondes comprises.
- Les prescriptions applicables en matière de maintien de la stabilité des mesures (réétalonnage, calibrage, etc.) doivent être respectées.

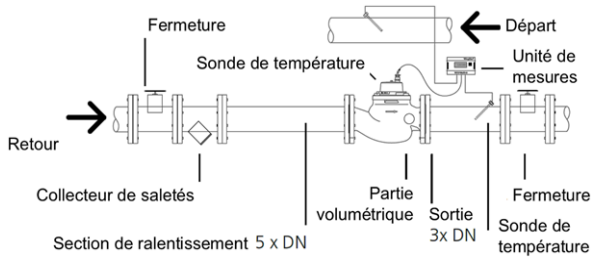



Figure 7.10 Installation d'un compteur de chaleur (source : WDV-Molliné GmbH).

### 7.4.4 Influence sur l'autorité de la vanne

Les fabricants de compteurs de chaleur indiquent le débit nominal de chaque compteur. Cependant, lorsque les compteurs de chaleur sont réellement conçus pour ce débit nominal, il en résulte des chutes de pression de 20 à 25 kPa.

Ces importantes chutes de pression liées à la désignation trompeuse de « débit nominal » conduisent régulièrement à des erreurs de conception : en effet, le compteur de débit est souvent installé sur un tronçon à débit variable afin que la différence de température correspondante soit la plus importante possible (meilleure précision de mesure). Mais cela a pour conséquence, souvent oubliée, de détériorer l'autorité de la vanne de régulation ! Il en résulte un conflit d'objectifs : d'une part, la chute de pression au niveau du compteur doit être aussi faible que possible pour garantir une bonne autorité de la vanne, d'autre part, une faible chute de pression signifie également une précision moindre dans la plage de débit inférieure. Les conseils suivants peuvent être donnés:

- Si les petits compteurs de chaleur sont conçus de manière à ce que le débit réel corresponde à environ 50 % du débit nominal indiqué par le fabricant, on obtient des chutes de pression raisonnables d'environ 5 kPa avec une précision acceptable.
- Les différents types de construction proposés aujourd'hui permettent toujours de trouver des solutions adaptées. Les débitmètres magnéto-inductifs et la mesure du débit par ultrasons (éventuellement selon le principe du jet oscillant) permettent de réaliser des compteurs de chaleur plus grands avec une faible perte de charge.

## 7.5 Accumulateur de chaleur

### 7.5.1 Accumulateur de chaleur dans la centrale de chauffage

Les chaudières à bois ne peuvent pas augmenter ou réduire leur puissance à volonté ; le processus de combustion du bois et la masse thermique des chaudières limitent cette possibilité. En règle générale, les variations de puissance ne peuvent dépasser 0,5 % à 1 % par minute. La fonction de l'accumulateur de chaleur dans la centrale de chauffage est de compenser les variations courtes et rapides de la demande de puissance (pics de charge, baisses de charge) des consommateurs de chaleur, afin que le chauffage au bois puisse suivre lentement la demande moyenne de puissance (courbe de charge). C'est la seule façon de garantir de faibles niveaux d'émissions, une usure réduite de l'installation et, par conséquent, de faibles coûts d'entretien ainsi qu'une longue durée de vie de l'installation. Pour que l'accumulateur puisse remplir cette fonction, les conditions suivantes doivent être remplies :

- Volume de stockage suffisant
- Sonde de température pour déterminer l'état de charge de l'accumulateur
- Bonne stratification de la température dans le réservoir
- Gestion du chargement du ballon

**Volume de stockage**

Dans les installations principalement utilisées pour le chauffage des locaux, le ballon de stockage doit pouvoir absorber au moins la chaleur dégagée pendant une heure à la puissance nominale du chauffage au bois. La différence de température utile entre le niveau de température supérieur et inférieur dans le ballon de stockage est prise en compte (voir la Figure 7.11). Le niveau de température en haut correspond à la température de sortie de la chaudière, le niveau de température en bas correspond à la température de retour maximale des consommateurs de chaleur à l'état de conception par temps froid. En cas de deux chauffages au bois ou plus, on choisit comme valeur de référence au moins deux tiers de la somme des puissances nominales. Il est toutefois recommandé d'utiliser également la somme des puissances nominales comme valeur de référence pour les installations à plusieurs chaudières. En cas de variations de charge très importantes et/ou rapides, par exemple dues à la chaleur industrielle, aux pics de consommation d'eau chaude dans les installations sportives, à l'utilisation de stations d'eau fraîche, à des installations de ventilation, à des serres, etc., le volume de stockage doit être considérablement augmenté. Vous trouverez de plus amples informations à ce sujet au chapitre 13.5.5.

Si le volume de stockage nécessaire ne peut être réalisé dans un seul accumulateur en raison de contraintes d'espace et de hauteur de pièce, il doit être réparti sur deux ou plusieurs accumulateurs. En règle générale, le fonctionnement hydraulique en série des accumulateurs est recommandé, à condition que la vitesse d'écoulement maximale dans les accumulateurs ne dépasse pas 6 m/h à 10 m/h. Le fonctionnement hydraulique en parallèle des accumulateurs nécessite une tuyauterie très soignée selon le principe de Tichelmann, de sorte que toutes les conduites vers les accumulateurs présentent exactement la même chute de pression. Dans la pratique, cela est rarement mis en œuvre correctement. La Figure 7.12 montre une disposition en série de deux accumulateurs avec les positions recommandées des sondes de température. Le Guide de planification Chauffage à distance[19] approfondit le sujet au chapitre 2.10.4 Types de construction et modes de fonctionnement des accumulateurs de chaleur.

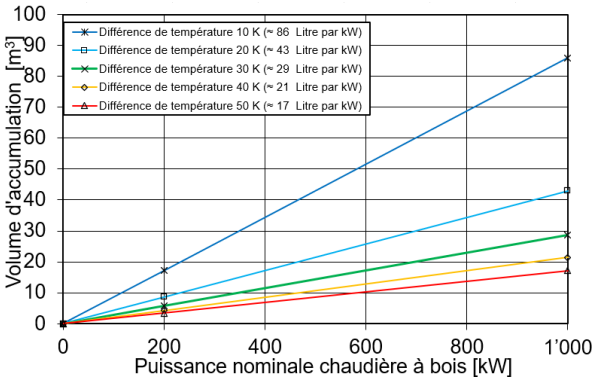



Figure 7.11 Volume de l'accumulateur thermique en fonction de la puissance nominale de la chaudière et de la différence de température.

**Sonde de température**

Au moins cinq sondes de température doivent être réparties uniformément sur l'accumulateur thermique. Pour les accumulateurs de grande taille, il convient d'utiliser si possible 10 sondes de température. Elles permettent de déterminer l'état de charge de l'accumulateur thermique. Si les sondes de température sont réparties sur plusieurs accumulateurs, il convient d'utiliser au moins cinq sondes de température au total, si possible jusqu'à cinq sondes de température par accumulateur, et de les interpréter par le système de régulation pour le calcul de l'état de charge.

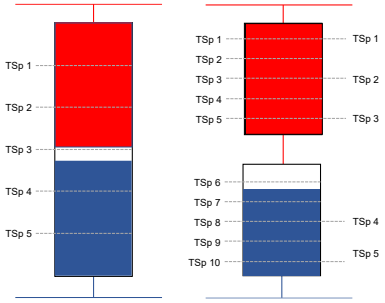



Figure 7.12 Disposition recommandée de 5 sondes de température pour un accumulateur (à gauche) et de dix ou cinq sondes de température pour deux accumulateurs en série (à droite).

**Stratification de la température**

L'accumulateur de chaleur doit présenter une stratification thermique prononcée. Cela nécessite un équilibrage hydraulique des débits volumiques des générateurs de chaleur et de la consommation de chaleur par temps froid. Les vitesses d'écoulement dans l'accumulateur thermique doivent être aussi faibles que possible. L'entrée et la sortie de l'eau ne doivent pas provoquer de mélange dans l'accumulateur thermique, ce qui peut être obtenu, par exemple, en utilisant des tôles perforées dans la zone d'entrée/sortie. La Figure 7.13 montre la stratification thermique dans un accumulateur lors du chargement et du déchargement. Une bonne stratification de la température se caractérise par le fait que les sondes de température ne changent pas toutes en même temps, mais que chacune d'entre elles change de température l'une après l'autre. Lors du déchargement, la température de la sonde la plus basse baisse en premier. Lors du chargement, la température de la sonde la plus basse augmente en dernier.

**Important**

Afin de maintenir la stratification thermique dans l'accumulateur, la température de sortie de la chaudière doit être maintenue constante, indépendamment de la puissance actuelle de la chaudière et même lors de la mise hors tension et sous tension de la chaudière. Cela nécessite une régulation de la température de sortie de la chaudière à une valeur constante. Cela s'effectue via une spécification correspondante de la température d'entrée de la chaudière en fonction de la puissance souhaitée de la chaudière. En augmentant la température d'entrée de la chaudière après sa mise hors tension juste en dessous de la température de sortie de la chaudière, celle-ci peut être maintenue constante pendant le fonctionnement en veille.

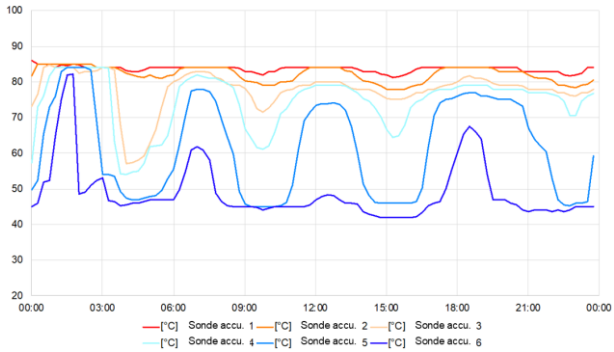



Figure 7.13 Évolution des températures dans l'accumulateur lors du chargement et du déchargement.

**Gestion du chargement de l'accumulateur**

L'accumulateur thermique est un indicateur des variations de la demande en puissance. Si la demande en puissance du réseau de chaleur augmente par rapport à la puissance actuelle de la chaudière à bois, la couche froide de l'accumulateur remonte lentement, ce qui réduit l'état de charge de l'accumulateur. Pour que l'accumulateur thermique puisse compenser l'augmentation ou la diminution à court terme de la charge, il doit être chaud dans sa moitié supérieure et froid dans sa moitié inférieure. Il doit donc présenter un état de charge d'environ 50 %. Un régulateur PI compare à cet effet la valeur réelle et la valeur de consigne de l'état de charge de l'accumulateur. Il régule l'état de charge de l'accumulateur en augmentant ou en diminuant lentement la puissance du chauffage au bois (voir la Figure 7.14). Lorsque l'état de charge de consigne est atteint, la puissance de la chaudière est réduite à la charge minimale (par exemple 30 %). Si deux chauffages au bois fonctionnent simultanément, les deux chaudières reçoivent la même consigne de puissance de la part du système de gestion de la charge de l'accumulateur.

Pour une consigne de puissance optimale des chaudières à bois par le régulateur PI, une mesure précise de l'état de charge du ballon est nécessaire.

Vous trouverez des informations supplémentaires dans les solutions standards partie I et partie II (détection de l'état de charge du ballon, variantes 1 à 4) ou dans *la FAQ 21 : Quels sont les avantages d'un accumulateur et comment doit-il être conçu ?*

Au cours de la planification, une description fonctionnelle complète de l'installation doit être établie, qui comprend notamment une stratégie de régulation pour la gestion du chargement du ballon (voir chapitre 5.10.3). Dès les appels d'offres et les contrats avec les planificateurs et les fabricants, il convient de définir clairement qui est responsable de la définition et de la mise en œuvre de la gestion du chargement de l'accumulateur.

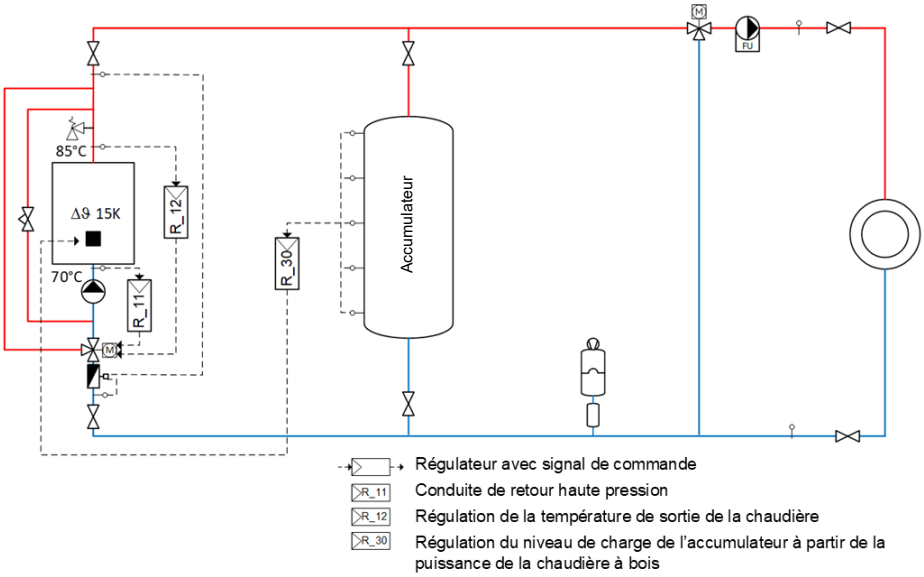



Figure 7.14 Régulation de l'état de charge de l'accumulateur avec la puissance de la chaudière à bois comme variable de réglage.

## 7.5.2 Intégration hydraulique de l'accumulateur thermique

Pour une intégration hydraulique sans problème du générateur de chaleur, de l'accumulateur thermique et des raccords « sans pression », ceux-ci doivent être disposés les uns à côté des autres dans un ordre précis (schéma A selon la Figure 7.15). Les écarts problématiques par rapport à l'exigence de base ci-dessus sont décrits dans les schémas B à F avec des suggestions de solutions (voir les Figure 7.16 à Figure 7.20

Les problèmes fondamentaux qui surviennent lorsqu'un générateur de chaleur (chaudière à bois, pompe à chaleur, etc.), un accumulateur et un raccordement « sans pression » (distributeur, pré-régulation, conduite à distance, etc.) sont interconnectés sont illustrés sur les Figure 7.15 à Figure 7.20.

**Circuit A**
Ce circuit ne pose aucun problème, car la chute de pression au niveau du ballon est faible. Le générateur et le consommateur sont parfaitement découplés sur le plan hydraulique (Figure 7.15).

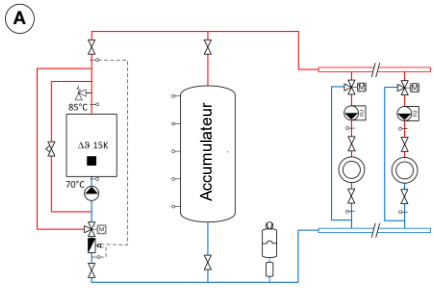



Figure 7.15 Intégration hydraulique de l'accumulateur de chaleur – Circuit A.

**Circuit B**
L'accumulateur est installé loin du générateur de chaleur et du distributeur (Figure 7.16 ). La chute de pression Δp dans la conduite à distance et l'accumulateur provoque, lorsque la conduite de raccordement à l'accumulateur est trop longue, une variation inadmissible de la différence de pression de raccordement du distributeur « sans pression » lors du chargement et du déchargement. L'expérience montre qu'une conception minutieuse des vannes de régulation permet de supporter une variation maximale de la différence de pression d'environ 3 kPa.

B

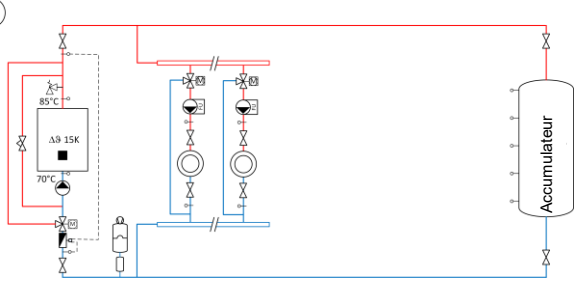



Figure 7.16 Intégration hydraulique de l'accumulateur de chaleur – circuit B.

**Circuit C**

Un distributeur éloigné pose des difficultés, car le distributeur « sans pression » est ici soumis à une pression correspondant à la chute de pression sur la longue conduite de raccordement et le réservoir (Figure 7.17). Contrairement au circuit B, la variation de la différence de pression de raccordement ne se produit ici que dans un seul sens. La différence de pression de raccordement maximale pouvant être supportée est la suivante :

- La chute de pression au niveau de chaque vanne de régulation du distributeur doit être supérieure à la différence de pression de raccordement (autorité de la vanne ≥ 0,5) ; d'après l'expérience, la chute de pression au niveau des vannes de régulation est rarement supérieure à 3 à 5 kPa dans les distributeurs existants, la différence de pression de raccordement ne doit donc pas être supérieure.
- De plus, la chute de pression sur la longue conduite de raccordement ne doit pas être supérieure à 20 % de la hauteur de refoulement de la plus petite pompe du groupe (pour éviter toute perturbation entre les groupes au niveau du distributeur).

C

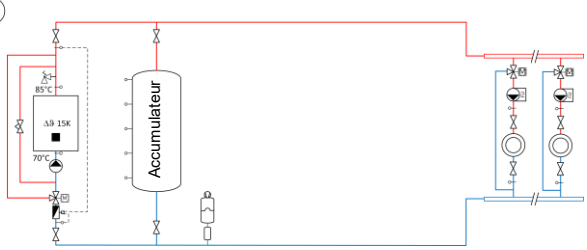



Figure 7.17 Intégration hydraulique de l'accumulateur de chaleur – circuit C.

**Circuit D**

Une pompe de conduite à distance et un bypass dans le distributeur ne constituent malheureusement pas une solution, car cela entraîne un mélange inadmissible de la température de retour (Figure 7.18).

D

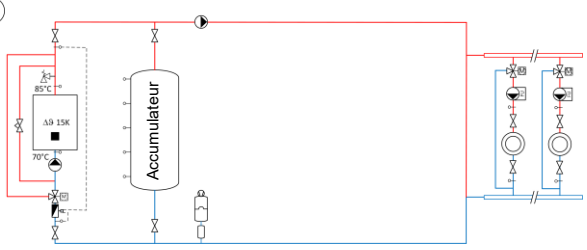



Figure 7.18 Intégration hydraulique de l'accumulateur de chaleur – circuit D.

**Circuit E**

Le ballon peut également être installé le plus près possible du distributeur ; la différence de pression de raccordement du distributeur est alors suffisamment faible Figure 7.19 ). Il faut toutefois veiller à ce que la vanne de régulation du circuit du générateur de chaleur soit installée aussi près que possible du générateur de chaleur (temps mort réduit) et que la chute de pression au niveau de la vanne de régulation soit au moins égale à la chute de pression au niveau de la conduite à distance et de l'accumulateur (autorité de la vanne ≥ 0,5).

E

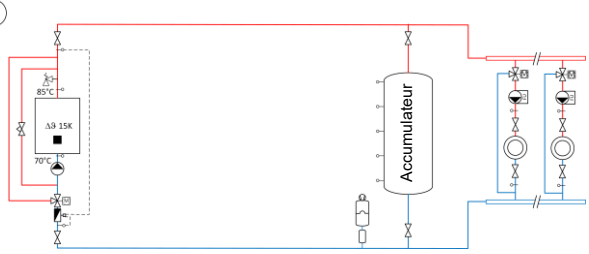



Figure 7.19 Intégration hydraulique de l'accumulateur de stockage de chaleur – circuit E.

**Circuit F**

Une solution qui fonctionne toujours consiste à utiliser un distributeur d'injection avec des vannes à passage direct, relié à une pompe à distance à vitesse variable (Figure 7.20). Du point de vue de la régulation, il est préférable que la mesure de la différence de pression soit effectuée le plus près possible du distributeur, car cette valeur de consigne détermine l'autorité des vannes de régulation. Il est expressément déconseillé d'essayer de réguler un distributeur « sans pression » à Δp = 0. Une régulation à Δp < 10 kPa est pratiquement impossible, car cela est tout simplement trop pour un distributeur « sans pression ».

F

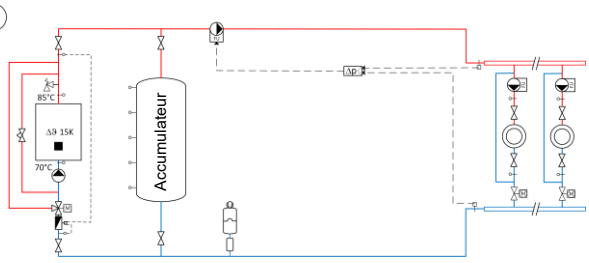



Figure 7.20 Intégration hydraulique de l'accumulateur de chaleur – Circuit F.

**Variante supplémentaire: intégration hydraulique d'un accumulateur avec séparation du réseau de production de chaleur/réseau de chauffage à distance**

Une séparation du réseau entre la production de chaleur et le réseau de chauffage à distance est nécessaire lorsque les pressions élevées dans le réseau de chauffage à distance, causées par de grandes différences de hauteur géodésique, ne peuvent pas être transférées à l'intégration hydraulique de la production de chaleur avec accumulateur (Figure 7.21). Il convient de veiller à ce que la différence de température entre la température de retour côté primaire de la production de chaleur et la température de retour côté secondaire du réseau de chauffage à distance via le ou les échangeurs de chaleur soit

inférieure à 5 K à chaque point de fonctionnement. L'objectif est de maintenir une différence de température < 3 K afin que la capacité de stockage ne soit pas réduite par une température de retour côté primaire plus élevée pour la production de chaleur.

Si le débit volumique à travers l'échangeur de chaleur est trop faible, le gradient augmente fortement en raison d'une forte diminution du transfert de chaleur due au fonctionnement dans la zone d'écoulement laminaire. La répartition de la puissance entre les différents échangeurs de chaleur doit donc être effectuée de manière à garantir un écoulement turbulent dans chaque échangeur de chaleur actuellement en service à chaque point de fonctionnement.

En outre, il convient de s'assurer, au niveau de la régulation, qu'aucun pic ou baisse de charge à court terme ne se produit lors de la mise en service et de la mise hors service des échangeurs de chaleur du côté primaire (production de chaleur). Cela peut se faire, par exemple, en mettant en service un échangeur de chaleur supplémentaire à sa puissance nominale de transfert, tandis que l'échangeur de chaleur déjà en service continue de fonctionner en parallèle à sa puissance nominale de transfert et que les deux échangeurs de chaleur ne sont régulés ensemble que lorsque la puissance de transfert est trop élevée. Les pics ou baisses de charge qui en résultent doivent être compensés par le stockage. Le transfert de chaleur entre le réseau de chauffage à distance et la production de chaleur doit être effectué de manière que la courbe de charge côté primaire (production de chaleur) soit identique à la courbe de charge côté secondaire (réseau de chauffage).

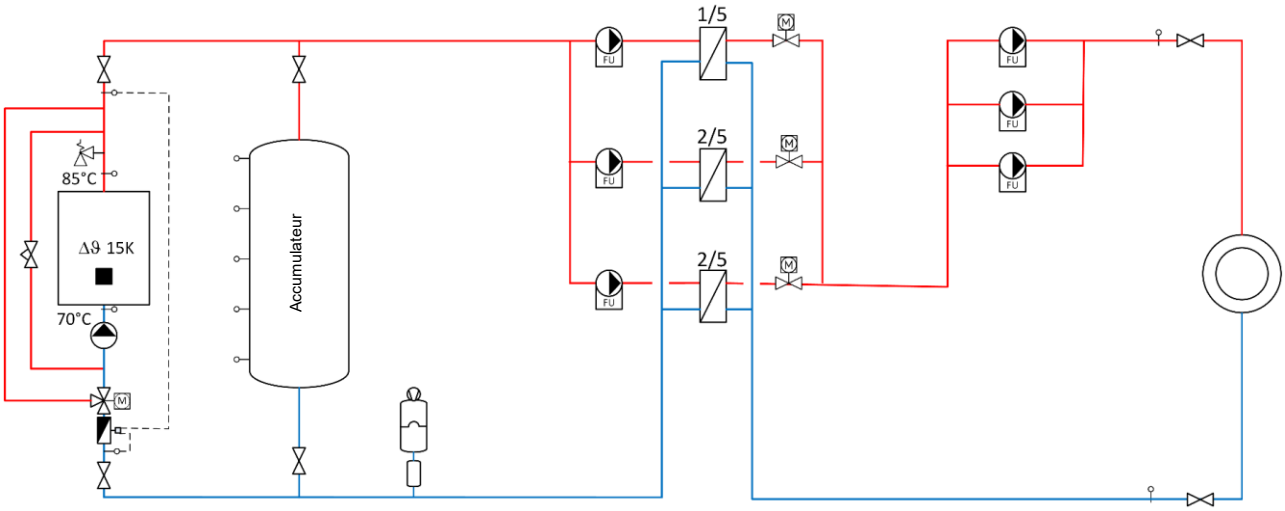



Figure 7.21 Séparation du réseau de production de chaleur/réseau de chauffage à distance avec trois échangeurs de chaleur.

## 7.6 Questions sur l'hydraulique de la production de chaleur

### 7.6.1 Qualité de l'eau

La qualité de l'eau caloporteuse dans le système hydraulique de la centrale de chauffage et du réseau de chaleur doit faire l'objet d'une attention particulière pour les raisons suivantes :

- Prévention de la corrosion : la teneur en oxygène ne doit pas dépasser la valeur limite fixée dans les directives et normes. **Le dégazage systématique de l'eau de chauffage à l'aide d'un dégazeur** permet généralement de réduire la teneur en oxygène en dessous de la valeur limite sans ajouter de produits chimiques. Si la teneur en oxygène est trop élevée, le pH descend également en dessous de la valeur limite et l'apparition de particules de magnétite noires indique des processus de corrosion.
- Prévention du tartre : si la dureté totale ou la teneur en carbonate de calcium est supérieure à la valeur limite, du tartre se forme sur les surfaces d'échange thermique (surfaces de chaudière) des générateurs de chaleur. Une forte formation de tartre peut entraîner une surchauffe locale (points chauds), car le tartre empêche le transfert de chaleur ou le débit d'eau de chauffage. La structure de l'échangeur de chaleur (structure de la chaudière) peut ainsi être endommagée en cas de forte formation de tartre.
- Le **premier remplissage et l'appoint du système hydraulique de la centrale de chauffage et du réseau de chaleur doivent** être effectués **avec de l'eau traitée** conformément aux directives et normes nationales et aux spécifications du fabricant de la chaudière.
- Un **contrôle annuel de la qualité de l'eau de chauffage**, au cours duquel toutes les valeurs limites sont vérifiées au moyen d'une analyse de l'eau conformément aux directives et normes, est nécessaire pour garantir une qualité d'eau élevée et constante.

**Les exigences** relatives à l'eau de circulation varient fondamentalement en fonction de la température de service. On distingue l'eau chaude < 110 °C et l'eau très chaude > 110 °C. Pour l'eau chaude, on distingue également entre un mode de fonctionnement pauvre en sel et un mode de fonctionnement salin. La taille de l'installation, le volume d'eau ainsi que les valeurs indicatives et les exigences des fabricants de composants (robinetterie,

vannes de régulation, échangeurs de chaleur, etc.) doivent également être pris en compte.

Des informations détaillées sur la qualité de l'eau et les exigences sont disponibles dans le Guide de planification Chauffage à distance (voir [19] page 93 et suivantes). Une présentation complète est également fournie par la réglementation AGFW FW 510 [74] ou la directive SWKI BT102-01 [75] . En principe, les normes et directives nationales applicables en matière de qualité de l'eau dans les installations de chauffage et les réseaux de chauffage à distance, ainsi que les spécifications des fabricants, doivent être respectées.

### 7.6.2 Prévention des circulations incorrectes

Les générateurs de chaleur hors service (chaudières à bois, chaudières à mazout/gaz, etc.) doivent être séparés hydrauliquement de la production totale de chaleur afin d'éviter les circulations incorrectes qui maintiennent le générateur de chaleur concerné à sa température de service ou entraînent des pertes de chaleur indésirables.

Les mesures suivantes doivent être mises en œuvre :

- Fermeture contrôlée de la vanne de régulation à trois voies dans le circuit du générateur de chaleur.
- Installation de robinets d'arrêt automatiques dans la section à débit variable du circuit du générateur de chaleur.
- Prévention de la circulation monotube par des clapets anti-retour.

# 8 Composants de la distribution de chaleur

## 8.1 Aperçu

Le chapitre « 8 » (Réseaux thermiques) donne un aperçu des principes fondamentaux de la distribution de chaleur et du transfert de chaleur aux clients. Les thèmes suivants sont abordés:

- Systèmes de tuyauterie
- Raccords
- Surveillance des fuites
- Transmission de données et communication
- Structure du réseau
- Méthodes et situations de pose
- Qualité de l'eau
- Transfert de chaleur

Les thèmes mentionnés ci-dessus ne sont toutefois pas traités en détail. Pour des informations plus précises, veuillez-vous reporter au Guide de planification Chauffage à distance [19] et au guide de planification des stations de transfert de chauffage à distance [76]. D'autres ouvrages peuvent également être recommandés, tels que le manuel District Heating and Cooling [77] ou les documents des associations nationales correspondantes (telles que AGFW ou VFS). Lors de la planification et de l'exploitation, il convient également de respecter les spécifications propres à l'entreprise et au pays, qui ne sont pas abordées dans le présent manuel de planification.

## 8.2 Systèmes de tuyauterie

Lors de la construction de réseaux de chauffage à distance et à distance, on utilise presque exclusivement des conduites pré-isolés, qui sont généralement posés dans le sol. Les conduites pré-isolés se composent d'un tuyau de transport dans lequel circule le fluide caloporteur, d'un matériau isolant qui réduit les pertes de chaleur vers l'environnement et d'une gaine qui protège contre les dommages mécaniques. La plupart du temps, des éléments supplémentaires tels que des câbles de données ou des systèmes d'alerte en cas de fuite sont intégrés dans l'isolation de la conduite. Le choix du système de conduites et de la technique de pose appropriée dépend non seulement de la température et de la pression du réseau, mais aussi d'exigences qui varient en fonction des conditions du site :

- Conduites industrielles
- Environnement
- Bâtiments
- Routes
- Voies ferrées
- Passages souterrains
- Eaux souterraines
- Nature du sol
- Peuplement forestier.

Les conduites rigides pré-isolés à gaine composite en plastique (KMR) avec un tuyau de transport en acier sont le système de tuyauterie le plus couramment utilisé en raison de leur standardisation, de leur robustesse et du faible coût des matériaux. En outre, des systèmes de tuyauterie flexibles tels que les conduites de transport en plastique (PMR) et les conduites de transport en métal (MMR) sont également utilisés, principalement dans le domaine de la distribution secondaire et des raccordements domestiques. D'autres systèmes de canalisations possibles sont les conduites à gaine en acier et les conduites en PRV (voir [19] page 68 et suivantes).

Pour les systèmes de canalisations KMR, MMR et PMR, **des versions à double canalisation**, appelées « canalisations duo », sont également disponibles dans la gamme des diamètres nominaux inférieurs. Pour des applications spéciales, les canalisations à enveloppe en acier ou en PRV peuvent également être réalisées en version double ou multiple. Les systèmes à double canalisation et à canalisations multiples présentent les avantages suivants par rapport aux systèmes à canalisation unique :

- Faibles coûts d'installation (largeur de tranchée réduite)
- Pertes de chaleur spécifiques réduites
- Nombre de raccords à manchons réduit de moitié
- Réduction de moitié du nombre de carottages et de joints d'étanchéité pour l'entrée dans la maison
- Nombre réduit de raccords de dilatation.

Les doubles conduites avec MMR ou PMR sont particulièrement adaptés à la pose de maison à maison, car aucun raccordement ne doit être réalisé dans le sol. Lors de l'utilisation de doubles conduites avec KMR, les raccordements doivent être connus avec précision afin que les raccords nécessaires puissent être utilisés. L'installation ultérieure d'un raccordement est très coûteuse. Le tracé de la conduite doit être creusé avec précision, car les doubles conduites KMR sont très rigides. Les doubles conduites KMR sont intéressants pour les conduites de transport droites sans dérivations et avec une pente constante. En cas de sous-couches (en particulier sur de longues distances), il est possible de poser un double tuyau de petit diamètre.

Vous trouverez un aperçu des différents systèmes de conduites et de leurs domaines d'application dans le Tableau 8.1.

## 8.3 Raccords

Les raccords sont installés comme dispositifs d'arrêt. Cela permet de limiter l'interruption du fonctionnement du réseau en cas d'extensions ultérieures du réseau et de réparations éventuellement nécessaires. Les raccords sont également utilisés pour vidanger et purger les conduites. Les raccords doivent répondre aux exigences suivantes:

- Faible perte de pression
- Fermeture étanche dans les deux sens
- Étanchéité des passages de boîtier
- Faible entretien
- Encombrement réduit
- Faible bruit d'écoulement
- Interchangeabilité
- Isolable (thermiquement)
- Résistance du matériau du boîtier
- Fonctionnalité même en cas d'utilisation rare.

Certaines exigences s'influencent mutuellement, de sorte qu'il n'est pas possible de toutes les satisfaire simultanément et que les critères les plus importants doivent être définis en fonction des besoins. Il convient de noter que les robinets d'arrêt ne sont pas adaptés à des fins de régulation. Dans les réseaux de chauffage à distance et à distance, on utilise quatre types de robinets de base: les vannes, les soupapes, les robinets et les clapets, en fonction du diamètre nominal, de la température et de la pression. Les robinets sont installés dans la conduite soit par soudage, soit au moyen de raccords à bride.

Le manuel de planification du chauffage à distance traite en détail des robinets (voir [19] page 75 et suivantes).

Tableau 8.1 Aperçu des systèmes de tuyauterie [19].

| Système de tuyauterie | Domaine d'application | | | | Longueurs disponibles | | Version à double tube jusqu'à DN | Particularité |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Température de service maximale admissible | Température de service continue | Pression nominale PN | Diamètre nominal DN | Barres | Rouleaux | | |
| | °C | °C | bar | – | m | m | – | – |
| **KMR** | < 160 | < 140 | < 25 | 20 - 1 000 | 6/12/16* | – | DN 150 | Le système de canalisations le plus utilisé en raison de sa standardisation et de sa robustesse. |
| **MMR** | < 180 | < 160 | < 25 | 20 - 150 | 12* | < 1 000 | DN 50 | Relativement coûteux ; à utiliser lorsque les conditions de pose l'exigent |
| **PMR** | < 95 | < 80 | < 6 | 20 - 150 | 12* | < 780 | DN 65 | Relativement bon marché ; résistance limitée à la pression et à la température. Réduction parfois considérable de la durée de vie si la température de service maximale admissible est dépassée. À une température de service continue inférieure à 70 °C, la durée de vie peut atteindre 100 ans. |
| **GFK** | < 160 | < 160 | < 16 | 25 - 1 000 | 6* | – | – | Relativement cher ; uniquement pour les exigences particulières en matière de résistance à la corrosion |
| **SMR** | < 400 | < 400 | < 64 | 25 - 1 200 | 16* | – | ** | Relativement coûteux ; uniquement lorsque les conditions de pression, de température ou de pose l'exigent. |

KMR = tube rigide à gaine en plastique avec un tube intermédiaire en acier
MMR = Tuyau flexible à gaine en plastique avec un tube de transport en acier (ondulé ou lisse)
PMR = tube flexible à gaine en plastique avec un tube intermédiaire en plastique (par ex. PEX)
GFK = Tuyau rigide à gaine en plastique avec un tuyau intermédiaire en plastique renforcé de fibres de verre
SMR = Tuyau rigide à gaine en acier avec un tuyau intermédiaire en acier
* Longueur(s) standard, autres longueurs disponibles sur demande.
** Modèles spéciaux disponibles sur demande (par ex. modèles à plusieurs tubes)

## 8.4 Surveillance des fuites

Selon la technique de pose et le système de canalisations, les réseaux de chauffage à distance peuvent être équipés ou non de dispositifs de surveillance des fuites. L'expérience opérationnelle a montré qu'une surveillance continue avec localisation centralisée des fuites augmente la sécurité d'approvisionnement d'un réseau et permet ainsi de limiter les répercussions temporelles et économiques des dommages. C'est pourquoi il est généralement recommandé d'installer un dispositif de surveillance des fuites. La surveillance du réseau de chauffage à distance doit être effectuée en continu à des points de mesure prévus à cet effet.

La surveillance des fuites est considérée comme l'état de la technique pour les conduites à gaine en plastique avec des conduites en acier (KMR et MMR)[78]. Pour les conduites à gaine en plastique (PMR), la surveillance des fuites n'est généralement pas disponible en standard. Lors de la pose dans des canalisations, le contrôle visuel des regards est considéré comme suffisant ; le cas échéant, des dispositifs automatiques de surveillance des regards doivent être utilisés. Les conduites aériennes sont généralement exploitées sans système de surveillance.

Les systèmes de surveillance des fuites utilisés aujourd'hui mesurent soit la résistance électrique de l'isolation thermique entre deux fils, soit entre un fil et le tuyau de transport (mesure en fonctionnement à > 1 MOhm). En cas d'humidification de l'isolation thermique ou de l'indicateur, la résistance diminue. L'utilisation de deux fils permet de former une boucle de surveillance. La surveillance de cette boucle garantit la surveillance de l'ensemble du circuit. Lors du choix du système de surveillance des fuites, il convient de veiller à ce que le principe de mesure permette une détection précoce des dommages, par exemple l'infiltration d'humidité dans l'isolation

due à des dommages sur la gaine extérieure ou le tuyau de transport des conduites de chauffage à distance, ainsi que la localisation précise de ces dommages, afin que les travaux de maintenance puissent commencer le plus tôt possible. La mesure des fuites doit être intégrée dans la technique de contrôle, la visualisation et l'enregistrement continu des données.

Le manuel de planification du chauffage à distance traite en détail de la surveillance des fuites (voir [19] page 73 et ss). Trois systèmes différents sont présentés (système nordique, système Brandes et système indicateur) et comparés entre eux sur la base de divers critères (fils de détection, méthode de mesure, détection des défauts, tolérance d'affichage, possibilité de surveillance et longueur des sections de surveillance).

## 8.5 Transmission des données et communication

Dans la mise en œuvre des systèmes de chauffage à distance, l'intégration de systèmes de surveillance des données et des fuites fait aujourd'hui partie de l'état de la technique et devrait être réalisée partout, quelle que soit la taille de l'installation. Les avantages sont la possibilité d'une facturation simple, sûre et efficace, d'une détection centralisée des dysfonctionnements et la possibilité d'optimiser les installations des clients et de signaler les défauts (p. ex. dérive de la température de retour primaire).

Le contrôle ou la régulation des clients de chauffage par des régulateurs individuels est la solution la plus simple pour les petites installations. Pour les installations moyennes et grandes, une option de surveillance centralisée doit également être envisagée (p.ex. système de contrôle ou lecture à distance). L'échange constant de données rend les processus transparents dans l'ensemble du réseau de chauffage à distance et permet le réglage à distance de tous les paramètres de l'installation de chaque station de transfert. Les clients peuvent être aidés dans le réglage des installations depuis n'importe quel endroit (p. ex. via un ordinateur portable ou un téléphone mobile). Grâce à la saisie des différents compteurs de chaleur et à la transmission des données de mesure à un appareil central, il n'est plus nécessaire de relever les compteurs sur place.

## 8.6 Mise en place du réseau

Le terme « réseau de chauffage à distance » ou « réseau de distribution de chaleur » désigne le lien entre la production de chaleur et les consommateurs. Le choix de la structure du réseau, du tracé, du système de canalisations et de la méthode de pose est influencé par de nombreux facteurs. Outre la structure de l'habitat, les aspects techniques, géologiques, économiques et sécuritaires, mais aussi architecturaux et juridiques constituent des critères de décision importants. La zone de desserte et la taille d'un réseau de distribution de chaleur ne sont généralement pas fixées dès le départ, mais évoluent avec le temps.

Le réseau de distribution de chaleur est généralement divisé en conduites principales, secondaires et de raccordement aux bâtiments (voir la Figure 8.1). La conduite principale correspond à la première conduite à partir de la centrale thermique. On utilise également le terme de conduite principale ou, dans le cas de grands producteurs de chaleur situés loin des zones d'approvisionnement, le terme de conduite de transport. Les conduites secondaires, également appelées conduites de distribution, partent des conduites principales et servent à la sous-distribution vers les différentes zones d'approvisionnement. Les conduites de raccordement domestiques servent à raccorder un consommateur de chaleur à une conduite principale ou secondaire.

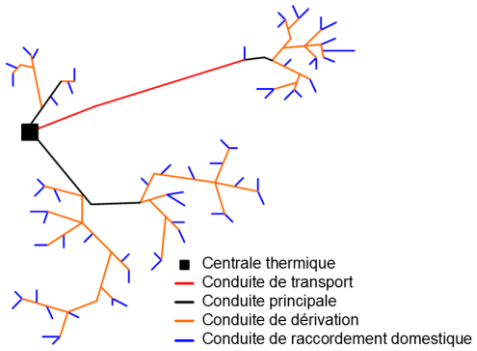



Figure 8.1 Structure du réseau et types de conduites [19].

Les réseaux de distribution de chaleur sont presque exclusivement conçus comme **des systèmes** fermés **à deux conduites** (une conduite d'alimentation et une conduite de retour). Ils sont rarement conçus comme **des systèmes à trois ou quatre conduites** avec plusieurs conduites d'alimentation et de retour, qui fonctionnent par exemple à des niveaux de température différents.

Outre la distinction selon le nombre de conduites, la **structure du réseau de distribution de chaleur** est influencée par le nombre de centrales thermiques ainsi que par le nombre et l'emplacement des différentes zones d'approvisionnement. Selon la situation et le développement du réseau de chaleur, le réseau de distribution de chaleur présente une structure arborescente, une boucle fermée ou un maillage.

Pour la **sous-distribution** et le raccordement des consommateurs de chaleur, on distingue généralement entre le tracé standard, le tracé maison à maison et le tracé en boucle.

Le manuel de planification du chauffage à distance décrit en détail la structure du réseau (voir [19] page 73 ss.).

## 8.7 Méthodes et situations de pose

La pose des conduites s'effectue généralement selon **les méthodes** suivantes :

- En surface sur des socles ou des supports pendulaires
- Sous terre dans des canaux
- Sous terre dans des tranchées
- Sous terre à l'aide de procédés sans tranchée
- Cas particuliers (siphons, ponts, etc.)

La méthode de pose dépend de différents facteurs. Les plus importants sont le système de canalisations utilisé et la situation sur place. **Les situations de pose** les plus courantes sont les suivantes:

- Surfaces stabilisées (voies publiques, zones urbaines, etc.) ou non stabilisées (zones rurales, terres cultivées, etc.).
- Tracé de conduites sur des sections de terrain marquantes et des infrastructures (lignes ferroviaires, ponts, cours d'eau, autoroutes, etc.)
- Prise en compte d'autres réseaux de conduites (électricité, gaz ou eau)
- Raccordement ultérieur à des conduites existantes

Selon la situation, les prescriptions, autorisations, concessions, etc. correspondantes doivent être prises en compte ou obtenues. Il ne faut pas sous-estimer l'exploitation à long terme et la sécurité de la conduite installée, qui doivent être prises en compte dans une analyse des risques lors de la planification, en fonction de la situation.

Le présent manuel de planification ne traite pas des **travaux publics et de la construction de canalisations**. Nous renvoyons ici au manuel de planification du chauffage à distance, qui traite ces thèmes en détail (voir [19] page 73 ss).

## 8.8 Qualité de l'eau dans le réseau de chauffage

Afin d'éviter les dommages causés par la corrosion, l'érosion ou la sursollicitation des matériaux dans les installations, l'eau circulant dans le réseau de distribution de chaleur et chez les clients doit répondre à certaines exigences.

Des informations détaillées sur la qualité de l'eau et les exigences sont disponibles dans le chapitre 7.6.1 et dans le manuel de planification du chauffage à distance (voir [19] page 93 ss.). Les sites [74] et [75] fournissent également des informations complètes à ce sujet. En principe, les normes et directives nationales applicables en matière de qualité de l'eau dans les installations de chauffage et les réseaux de chauffage à distance ainsi que les spécifications du fabricant doivent être respectées.

## 8.9 Transfert de chaleur

### 8.9.1 Raccordement des clients

L'installation domestique des clients peut être raccordée au réseau de chauffage à distance de deux manières :

- Raccordement direct sans échangeur de chaleur intermédiaire
- Raccordement indirect avec échangeur de chaleur intermédiaire

Dans le cas d'**un raccordement direct**, le fluide caloporteur provenant du réseau de chauffage à distance circule dans l'installation domestique. Le choix des matériaux doit tenir compte de la composition chimique du fluide caloporteur. Si la pression du réseau est supérieure à la pression admissible de l'installation domestique, le raccordement direct doit être réalisé avec une réduction de pression et une protection. En principe, la pression dans le retour du réseau de transport doit toujours être inférieure à la pression admissible dans l'installation domestique. La température maximale de départ dans le réseau de transport est déterminée par la température maximale admissible de départ de l'installation domestique.

En cas de **raccordement indirect**, le caloporteur primaire ne circule pas dans l'installation domestique, mais est séparé hydrauliquement du caloporteur secondaire par un échangeur de chaleur. Le côté primaire doit être conçu et sécurisé pour les températures et pressions maximales du réseau de chauffage à distance, le côté secondaire pour les pressions et températures domestiques.

### 8.9.2 Exigences relatives au transfert de chaleur

Les exigences relatives à la réalisation du raccordement thermique sont définies dans les **prescriptions techniques de raccordement (PTR)** ou **les conditions techniques de raccordement (CTR)** faisant partie du contrat de fourniture de chaleur. Elles servent de spécifications pour garantir le respect des exigences techniques lors de la planification, de la mise en œuvre et de l'exploitation de l'approvisionnement en chaleur. L'objectif des PTR est d'atteindre un niveau technique minimum, de garantir la qualité de l'approvisionnement en chaleur et d'éviter les erreurs grossières et les défauts. Elles précisent également si le raccordement au réseau de chauffage à distance doit se faire par un raccordement domestique direct ou indirect.

Les PTR doivent être concises, claires et précises. Il convient de renoncer aux normes et prescriptions qui doivent être respectées de manière générale. Les PTR doivent en outre fournir des indications réalistes concernant la température de retour, la pente, les pertes de pression, les matériaux, etc. et ne prescrire des produits que lorsque cela est nécessaire (p. ex. compteurs de chaleur, vannes, régulations, etc.). Les PTR doivent contenir des spécifications claires concernant le côté secondaire, par exemple en matière de chauffage de l'eau chaude ou d'installations hydrauliques non autorisées. Les PTR peuvent être structurées comme suit :

- Partie générale
- Bases techniques
- Spécifications relatives à l'équipement
- Intégration du côté secondaire
- Spécifications opérationnelles
- Annexes.

Vous trouverez de plus amples informations et des détails sur les contenus du PTR mentionnés ci-dessus dans le guide pour la planification des stations de transfert de chauffage à distance [76] et dans la fiche technique AGFW FW 515 – Conditions techniques de raccordement – Eau de chauffage [79].

Une station de transfert de chauffage à distance doit **au minimum** être conçue de manière à faciliter son utilisation, son entretien et sa maintenance, être réalisée conformément aux prescriptions techniques de raccordement de l'entreprise de fourniture de chaleur et respecter les normes et directives applicables. Dans le guide de planification des stations de transfert de chauffage à distance [76], les composants suivants ont été définis comme équipement minimal pour une station de transfert de chauffage à distance (voir la Figure 8.2) :

1. Robinets d'arrêt dans le départ et le retour
2. Indicateur visuel de température (thermomètre) dans le circuit aller et retour
3. Indicateur visuel de pression (manomètre) dans les circuits aller et retour
4. Purge dans le départ (en haut) et vidange dans le retour (en bas)
5. Filtre dans le départ avant l'échangeur thermique (côté primaire) et
   Filtre à impuretés dans le retour avant l'entrée de l'échangeur thermique (côté secondaire)
6. Échangeur thermique
7. Vanne combinée avec servomoteur
8. Compteur de chaleur (débitmètre, mesure de température, calculateur, sondes de température dans le départ et le retour)
9. Soupape de sécurité à ressort
10. Vase d'expansion ou d'équilibrage
11. Régulateur pour la température de départ côté secondaire
    - Sonde de température dans le départ côté secondaire
    - Sonde de température dans le retour côté primaire
    - Sonde de température pour la température extérieure (si la régulation est en fonction des conditions climatiques)
    - Raccordement à la vanne combinée
12. Sonde de température extérieure.

Le guide pour la planification des stations de transfert de chauffage à distance [76] fournit des recommandations de base pour la conception des composants les plus importants, définit les exigences relatives au système de distribution de chaleur et au chauffage de l'eau chaude dans le bâtiment raccordé (côté secondaire) et décrit le déroulement de la planification et de l'exploitation de l'installation.

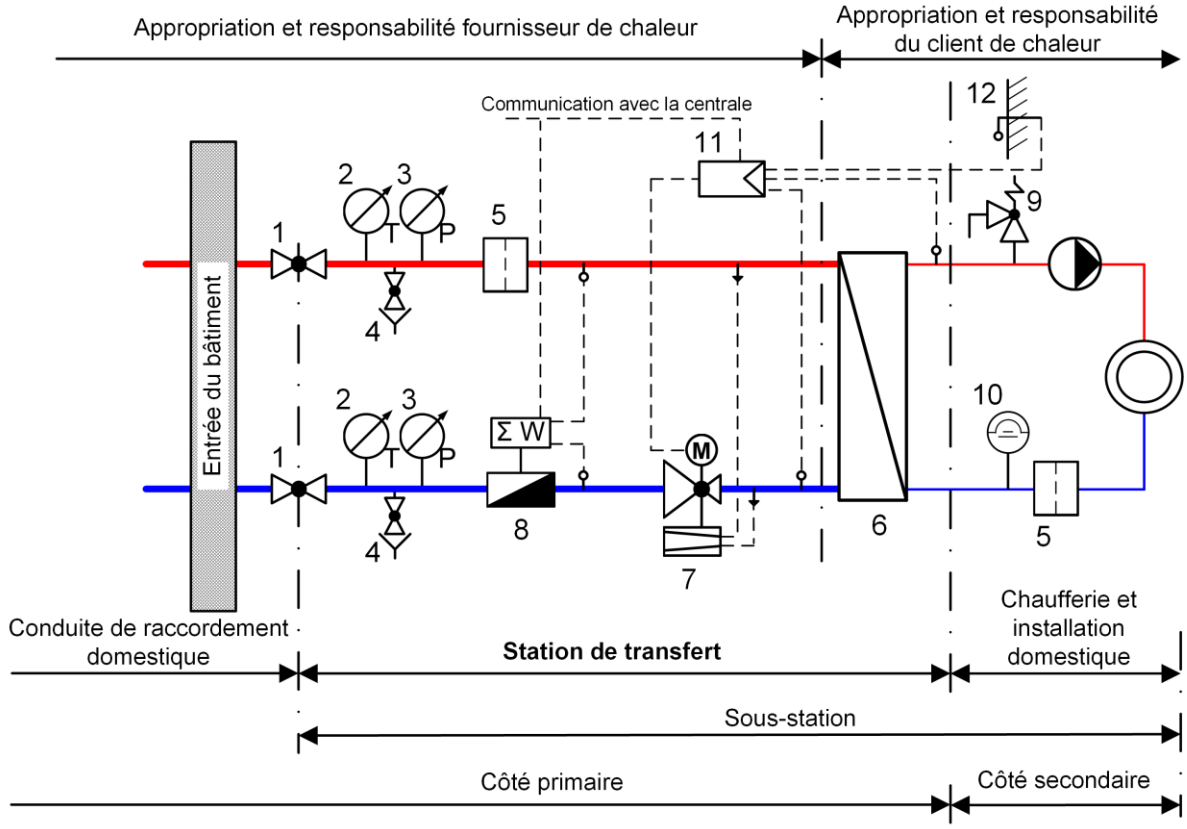



Figure 8.2 Exigences minimales pour les stations de transfert de chauffage à distance [76].

# 9 Cendres

## 9.1 Production de cendres

L'utilisation énergétique des combustibles bois génère des cendres de bois en quantités et qualités variables. Celles-ci doivent être éliminées ou valorisées dans le respect de l'environnement afin de protéger les eaux et les sols. En termes de quantité, les cendres issues de la combustion du bois représentent entre 0.5 et 8 % du poids du bois utilisé. Les granulés ont le pourcentage de cendres le plus faible. Les granulés de la meilleure qualité (ENplus A1) contiennent au maximum 0.7 % de cendres en poids. Lors de l'utilisation de combustibles bois à forte teneur en écorce et en aiguilles et comportant de nombreuses impuretés, ainsi que lors de l'utilisation de bois usagé, la production de cendres peut atteindre jusqu'à 8 % en poids. À titre indicatif, on peut considérer que la quantité annuelle de cendres par MW de puissance nominale de la chaudière est d'environ 10 t/a à 20 t/a pour les plaquettes de bois avec écorce et d'environ 8 t/a à 15 t/a pour les plaquettes de bois sans écorce [80]. Le Tableau 9.1 montre la quantité annuelle de cendres provenant de la combustion du bois en Autriche, en Allemagne et en Suisse. En raison de l'utilisation accrue de bois-énergie, ces quantités augmenteront à l'avenir.

Tableau 9.1 Quantité de cendres en tonnes de matière sèche par an [t MS/a] provenant de la combustion du bois en Autriche (2017), Allemagne (2015) et Suisse (2018); sources ([81],[82],[83]).

| Pays et origine des cendres | Production de cendres t MS/a |
|---|---|
| Autriche total | 254'000 |
| Allemagne total | > 1'000'000 |
| Suisse total | 72'000 |
| dont : Installations < 50 kW | 18'000 |
| Installations à grille mobile > 50 kW | 41'000 |
| Cendres volantes cycloniques installations > 50 kW | 9'000 |
| Cendres de filtres cyclone > 50 kW | 4'000 |
| Cendres de filtresinstallations > 50 kW | |

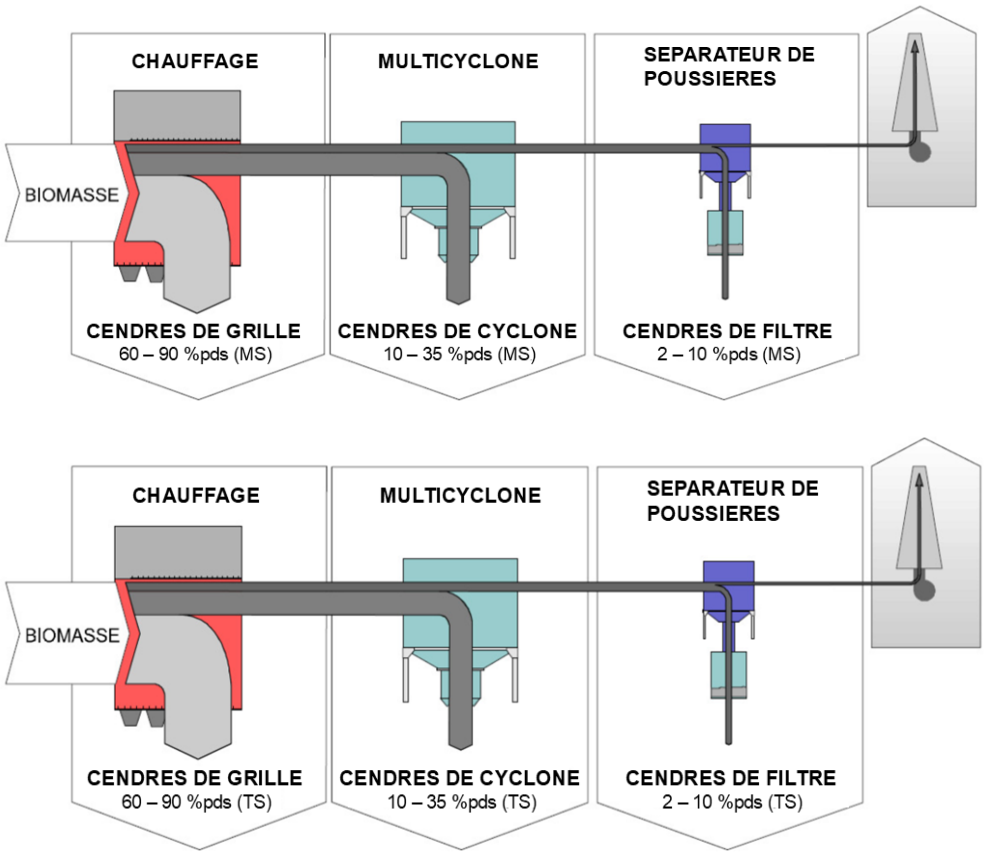



Figure 9.1 Proportions des différentes fractions de cendres en pourcentage du poids (matière sèche MS) [81].

## 9.2 Fractions de cendres

**Lieux de production des cendres**

Dans le cas des grandes installations de chauffage au bois automatiques, on distingue les fractions suivantes en fonction de l'endroit où les cendres se déposent et de la taille des particules (voir la Figure 9.1):

- Cendres grossières (cendres de grille, cendres de chaudière, cendres de lit)
- Cendres volantes cycloniques (cendres cycloniques, cendres volantes, cendres volantes de chaudière)
- Cendres volantes fines (cendres de filtre).

**Cendres de grille**

La proportion de cendres grossières (appelées cendres de lit dans les fours à lit fluidisé) représente entre 60 et 90 % du poids total des cendres produites. Les cendres grossières se forment dans la partie combustion de l'installation de combustion et constituent un résidu principalement minéral du bois utilisé. Selon le type de combustible et le degré d'impuretés, cette fraction de cendres est souvent mélangée à des matières étrangères telles que du sable, de la terre et des pierres, qui augmentent la proportion de cendres grossières. Dans le cas du bois usagé et des résidus de bois, une proportion notable de cendres grossières est principalement due à des impuretés sous forme de clous, de charnières, de résidus de ciment, etc. Ces éléments non combustibles sont également séparés principalement sous forme de cendres de grille. En revanche, les composants volatils tels que les métaux lourds et les sels sont davantage transférés dans la phase gazeuse et s'accumulent donc en concentrations élevées dans les cendres cycloniques et les cendres fines. La qualité de la combustion a également une grande influence sur la proportion de cendres grossières. La teneur en COT (carbone organique total) des cendres en est un indicateur. Une teneur élevée en COT signifie une grande quantité de matière non brûlée et rend impossibles certaines filières de valorisation (p. ex. industrie du ciment) ou la mise en décharge. Pour cette dernière, des valeurs limites de COT spécifiques à chaque pays s'appliquent. Les cendres grossières englobent également les cendres et les dépôts qui se forments'accumulent dans la chambre de combustion et dans la chaudière lors du nettoyage périodique de l'installation de combustion.

Les impuretés présentes dans le combustible (bois usagé) entraînent une baisse de la température du point de fusion des cendres. Cela conduit à la formation de scories et à des dépôts sur la grille et les parois, ainsi qu'à des températures trop élevées dans la chambre de combustion. En refroidissant, les dépôts deviennent vitreux et sont difficiles à éliminer.

**Cendres volantes cycloniques**

Entre 10 et 35 % en poids des cendres sont des cendres volantes cycloniques. Elles sont constituées de particulescomposants combustibles solides, principalement inorganiques, qui sont transportéestransportés dans les gaz d'échappement et s'accumulent dans les séparateurs cycloniques (séparateurs multicycloniques, séparateurs centrifuges) en aval de la chaudière. La taille des particules des cendres volantes cycloniques est suffisamment grande pour qu'elles puissent encore être séparées par gravité ou par force centrifuge (voir chapitre 5.8).

**Cendres volantes ultrafines**

Les cendres volantes ultrafines représentent 2 à 10 % en poids et ont une taille de particules si petite qu'elles se comportent comme un fluide et sont entraînées par le flux des gaz d'échappement. Elles ne peuvent donc être séparées qu'à l'aide de séparateurs de particules mécaniques ou électrostatiques (filtres électriques, filtres en tissu) ou de laveurs installés en aval de la chaudière et du séparateur cyclonique. Dans les laveurs (condensation des gaz d'échappement), les cendres filtrées se présentent sous forme de boues de condensation.

## 9.3 Composition des cendres

La composition des cendres dépend du type de combustibles utilisés, de la qualité de la combustion et du lieu où elles sont produites. Les cendres issues de bois naturel sont principalement composées de minéraux, de métaux alcalins et de sels. Elles contiennent des quantités importantes de phosphore et de potassium (voir le Tableau 9.2). Elles contiennent également de nombreux autres composants précieux tels que le calcium et le magnésium, ainsi que des oligo-éléments tels que le manganèse et le soufre.

Tableau 9.2 Proportions des nutriments pertinents dans différentes fractions de cendres issues de la combustion de bois naturel, en pourcentage du poids de la matière sèche [84].

| Nutriments | Cendres de grille [% en poids] | Cendres cycloniques [% en poids] | Cendres de filtration [% en poids] |
|---|---|---|---|
| Calcium CaO | 32 - 48 | 25 - 46 | 25 - 40 |
| Magnésium MgO | 5 - 7 | 3 - 5 | 3 - 4 |
| Potassium $K_2O$ | 4 - 8 | 4 - 9 | 7 - 21 |
| Phosphore $P_2O_5$ | 2 - 5 | 2 - 5 | 2 - 4 |
| Sodium $Na_2O$ | < 1 | < 1 | 1 - 2 |

Les cendres contiennent également des polluants, notamment des métaux lourds tels que l'arsenic, le plomb, le cadmium, le chrome (sous forme de chrome total, de chrome III et de chrome VI), le cuivre, le nickel, le mercure et le zinc (voir le Tableau 9.3 ). Ces substances se trouvent en concentrations particulièrement élevées dans les cendres fines et les concentrations sont les plus élevées lors de l'utilisation de bois usagé. Mais les cendres de grille issues de la combustion de bois naturel contiennent également des métaux lourds. Ceux-ci ont été absorbés par l'arbre au cours de sa vie par ses racines et se retrouvent sous forme concentrée dans les cendres. Dans le cas du bois usagé, les métaux lourds proviennent des ferrures, des peintures, des revêtements et des substances étrangères présentes dans le combustible. Les cendres provenant de séparateurs électriques humides présentent des teneurs en métaux lourds nettement plus élevées que celles provenant de séparateurs électriques secs.

Le chrome VI fait partie des métaux lourds particulièrement toxiques. Il est absorbé par l'arbre sous forme de chrome III à partir du sol et s'oxyde en chrome VI lors du processus thermique de combustion du bois. Cette oxydation se produit indépendamment du type de bois utilisé et ne peut pratiquement pas être influencée par des mesures techniques de combustion. Contrairement au chrome III, le chrome VI est très soluble dans l'eau, fortement toxique, mutagène et cancérigène. C'est pourquoi il convient, lors de la manipulation de cendres de bois, d'éviter la formation de poussière et de porter un équipement de protection individuelle adapté.



Figure 9.2 Mise en décharge place sans poussière des cendres de bois sans dégagement de poussière dans la décharge (source: Amstutz Holzenergie AG / Énergie-bois Suisse).

Le chrome VI ne joue qu'un rôle mineur dans les cendres grossières provenant d'installations équipées d'un système de décendrage humide, car le chrome y est principalement présent sous forme de chrome III.

Dans certaines conditions, le vieillissement des cendres avec ajout d'eau transforme le chrome VI en chrome III. Ce processus nécessite toutefois de l'espace et du temps et peut être accéléré par l'ajout d'agents réducteurs tels que le sulfate ferreux.

La composition différente des diverses fractions de cendres influence d'une part leurs possibilités de valorisation, mais aussi le type et les coûts de leur élimination. Les conditions-cadres varient d'un pays à l'autre. « Les déchets d'aujourd'hui sont les matières premières de demain » ! Dans la perspective d'une valorisation future, il est donc recommandé d'intégrer une collecte séparée des trois fractions de cendres dans les nouvelles installations de grande taille ou de prévoir des dispositions pour un tri ultérieur des cendres (voir chapitre 6.8).

Tableau 9.3 Teneurs typiques en métaux lourds en mg/kg MSTS des cendres issues de la combustion de différents combustibles ligneux et de différentes fractions de cendres. Pour les cendres fines, seules les cendres provenant de séparateurs électriques à sec ont été prises en compte ([84] ,[85] ,[86]).

| Métal lourd | Bois naturel | | | Résidus de bois | | | Bois usagé | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cendres grossières | Cendres volantes cycloniques | Cendres fines | Cendres grossières | Cendres volantes cycloniques | Cendres volantes fines | Cendres grossières | Cendres volantes cycloniques | Cendres volantes fines |
| Antimoine Sb | < 10 | < 10 | < 10 | 10 - 31 | < 30 | n.d. | 10 - 790 | n.d. | 50 - 810 |
| Arsenic As | < 1 | n.d. | < 15 | n.d. | n.d. | 59 - 140 | 13 - 41 | < 60 | 20 - 290 |
| Plomb Pb | 2 - 45 | 10 - 70 | 33 - 266 | 6 - 350 | 180 – 1'182 | n.d. | 10 – 2'144 | < 8'500 | < 50'000 |
| Cadmium Cd | 1 - 6 | 21 - 36 | 3 - 81 | 3 - 30 | 16 - 30 | n.d. | 10 - 100 | < 70 | 5 - 590 |
| Chrome Cr total | 12 - 325 | 127 - 189 | 101 - 332 | 72 - 747 | 78 - 212 | n.d. | 109 - 873 | < 1 415 | < 404 |
| Chrome Cr-VI | 3 - 14 | n.d. | 4 - 47 | 7 - 13 | n.d. | 42 - 66 | 3 - 66 | n.d. | 3 - 62 |
| Cuivre Cu | 100 - 996 | 120 - 350 | 84 - 630 | < 372 | < 288 | < 820 | 170 – 2'800 | n.d. | < 422 |
| Nickel Ni | 42 - 80 | 10 - 79 | 28 - 99 | ∅ 113 | ∅ 61 | n.d. | 23 - 412 | ∅ 167 | ∅ 74 |
| Mercure Hg | < 0,05 | < 0,1 | < 3,5 | < 0,5 | < 0,7 | n.d. | < 0,5 | n.d. | < 1,0 |
| Zinc Zn | 22 - 738 | 1 271 – 2'469 | 22 – 25'177 | ∅ 503 | ∅ 3'656 | n.d. | 1'234 – 22'000 | ∅ 15'667 | ∅ 164'000 |

Les possibilités de valorisation actuelles et futures dépendent toutefois fortement de la qualité des cendres. Celle-ci peut être influencée positivement dans le fonctionnement de l'installation comme suit [87]:

- Utilisation du combustible adapté à la combustion
- Éviter les impuretés dans le combustible
- Réglage correct des paramètres de combustion (un excès d'air primaire entraîne la formation de scories, un manque d'air primaire augmente la proportion de combustible non brûlé)
- Réduction de la température de la grille (refroidissement par eau, recirculation des gaz d'échappement primaires)
- Fonctionnement continu sans changements de charge rapides
- Stockage correct dans la centrale de chauffage.

## 9.4 Élimination et valorisation

Les cendres de bois peuvent en principe être éliminées ou valorisées. Les possibilités suivantes sont disponibles pour l'élimination ([81], [82], [88]) :

- Mise en décharge
- Utilisation comme matériau de remplissage dans le remblayage minier (peut également être considéré comme une forme de recyclage en raison de la stabilisation).

Les possibilités de valorisation suivantes sont disponibles:

- Utilisation industrielle (p. ex. comme agrégat ou matière première secondaire) pour le ciment et le béton
- Valorisation dans la construction de chemins et de routes
- Utilisation comme engrais agricole
- Ajout à des chaulages compensatoires en forêt
- Récupération de composants précieux.

Une **utilisation industrielle** dans l'industrie du ciment nécessite des quantités suffisantes, d'une qualité constante et élevée. Seules les très grandes installations de combustion peuvent donc être envisagées à cet effet. Il est important que les fractions de cendres soient collectées à sec et séparément. Les corps étrangers, les impuretés et une forte proportion de matériaux non brûlés rendent impossible leur utilisation dans l'industrie cimentière. La valorisation dans la production de certains types de béton (« béton maigre ») est moins exigeante à cet égard.

Les cendres de bois peuvent en principe être utilisées comme matériau de coffrage dans **la construction de routes et de chemins**, à condition que les sites se trouvent en dehors des zones de protection des eaux et des zones hydrogéologiques sensibles, ainsi qu'en dehors des zones inondables. Les cendres sont incorporées sous une couche de revêtement imperméable à l'eau en asphalte ou en béton et servent de couche de base non liée (couche antigel ou couche de base en gravier), de couche de base liée (hydraulique ou bitumineuse) ou de remblai routier (fondation). Lors de la mise en place et de la manipulation, il convient de veiller tout particulièrement à éviter la formation de poussière pour des raisons d'hygiène au travail.

Grâce à sa teneur en nutriments végétaux (voir le Tableau 9.2) et à ses propriétés fertilisantes, la cendre de bois est **un** excellent **engrais agricole**. En raison des métaux lourds qu'elle contient, seule la cendre grossière issue de la combustion de bois naturel peut être utilisée à cette fin. En combinaison avec des composants organiques (compost, produits de fermentation), il est possible de produire des engrais organiques-minéraux qui peuvent également être utilisés dans l'agriculture biologique. À l'heure du changement climatique, le potassium ($K_2O$), en tant qu'« élément de résistance à la sécheresse », et la chaux (CaO), en tant que condition préalable à l'absorption et au stockage de l'eau, revêtent une importance particulière. Pour pouvoir être utilisés comme engrais agricoles, ces produits doivent être soumis à un contrôle qualité strict, comme par exemple le label RAL en Allemagne. Leur utilisation comme engrais agricoles est soumise à des réglementations spécifiques à chaque pays, qui peuvent parfois varier considérablement les unes des autres (voir chapitre 19).

Dans le Bade-Wurtemberg au moins, l'utilisation de cendres de bois comme **additif dans le chaulage compensatoire des forêts** est désormais bien établie. La teneur maximale en cendres du mélange ne doit pas dépasser 30 %, les 70 % restants étant constitués de chaux dolomitique. Sur une période de 15 ans, un maximum de 2.5 tonnes de cendres par hectare peut être épandu. Seules les cendres de grille issues de la combustion de bois naturel et dont la qualité est garantie sont autorisées.

À l'instar des scories issues des usines d'incinération des déchets, les cendres de bois seront également utilisées à l'avenir pour la **récupération de substances précieuses**. Des projets sont en cours dans différents pays à cet égard (p.ex. la récupération du zinc à partir des cendres fines issues de la combustion de bois usagé).

Les filières de valorisation et d'élimination des cendres de bois dépendent fortement des lois, directives et réglementations nationales et sont parfois complexes. La situation dans certains pays est donc présentée ci-après. Les prescriptions mentionnées sont également regroupées au chapitre 19.

### 9.4.1 Situation en Suisse

En Suisse, l'élimination est actuellement au premier plan. L'ordonnance sur les déchets [89] prévoit la mise en décharge des cendres de bois conformément à la Figure 9.3.

Les cendres de bois provenant de petites installations doivent être éliminées avec les déchets dans une usine d'incinération des ordures ménagères.

Les cendres de grille, de cyclone et de filtre provenant de l'incinération de bois forestier et de résidus de bois dans de grandes installations doivent être déposées dans des décharges de type D et E.

Les cendres de grille provenant de la combustion de bois usagé doivent également être éliminées dans ces deux types de décharges D et E.

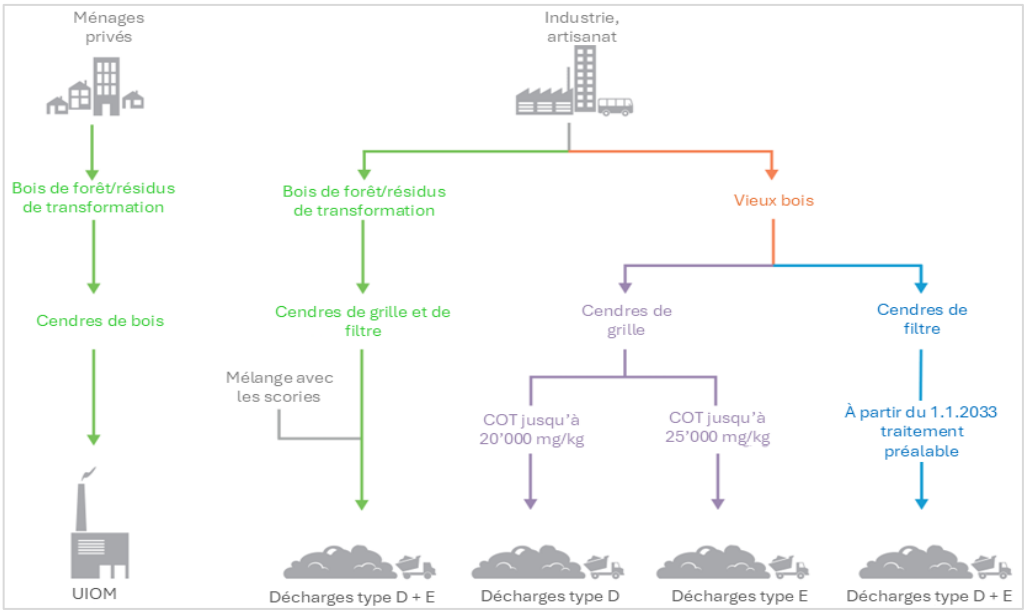



Figure 9.3

Voies d'élimination en Suisse (UIOM ... usine d'incinération des ordures ménagères, COT ... carbone organique total, types de décharges conformément à l'ordonnance suisse sur les déchets) [89].

Étant donné que ces deux décharges accueillent également des scories issues de l'incinération des déchets municipaux, qui contiennent de grandes quantités de fer libre, le chrome VI y est rapidement réduit en chrome III grâce à un bon mélange. Dans les décharges de type D, les cendres doivent respecter une valeur limite de COT de 20'000 mg/kg au maximum ; dans les décharges de type E, cette valeur limite est fixée à 50'000 mg/kg. Conformément à l'ordonnance sur les déchets (OLED), les cendres de filtration issues de l'incinération de bois usagé ne pourront plus être mise en décharge de type D ou E à partir du 1er janvier 2034 (art. 52a OLED), mais subir un traitement préalable approprié ou respecter les valeurs limites de l'annexe 5 OLED.

Les modalités d'application seront précisées dans la future aide à l'exécution « Résidus d'incinération, partie II, cendres de bois » de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Ce document définira également à partir de quelle limite de puissance une mise en décharge sera nécessaire.

La valorisation en tant qu'engrais agricole et forestier n'est pas possible en vertu de la réglementation actuelle. La valorisation industrielle n'en est qu'à ses débuts. Cela s'explique notamment par la capacité moyenne relativement faible du parc d'installations suisse. C'est pourquoi des efforts sont actuellement déployés pour mettre en place des systèmes de mise en commun régionaux.

### 9.4.2 Situation en Allemagne

En Allemagne, l'association « Bundesgütegemeinschaft Holzasche e.V. » a commencé, vers 2010, à mettre en place un système d'assurance qualité pour les cendres grossières issues de combustibles ligneux non traités (code de déchet 100101 conformément au règlement sur la liste des déchets [90]). L'objectif est de certifier les cendres de bois qui présentent des teneurs minimales en nutriments végétaux utiles, tels que le phosphore, le potassium et le magnésium, ainsi qu'en substances alcalines, tout en respectant les valeurs limites de polluants, en particulier pour les métaux lourds.

Le système d'assurance qualité repose sur le manuel de gestion de la qualité (QMH) relatif aux cendres de bois utilisées comme matière première pour les engrais et comme engrais. Les cendres de bois certifiées obtiennent, après une procédure de certification réussie, le label de qualité RAL « Engrais » (RAL-GZ 252) et restent ensuite soumises à une procédure de surveillance permanente (voir www.holzaschen.de).

La certification est délivrée par l'association fédérale pour la qualité des cendres de bois (Bundesgütegemeinschaft Holzasche e.V.), en tant qu'organisme indépendant relevant de l'association fédérale pour la qualité du compost (BGK). Outre les cendres issues de bois non traité, certaines fractions de cendres provenant d'autres combustibles issus de la biomasse, comme la paille, peuvent également obtenir la certification RAL-GZ 252 (www.kompost.de).

L'assurance qualité des cendres de bois vise à mettre en œuvre des concepts d'économie circulaire dans le cadre des dispositions applicables de la législation sur les déchets (KrWG [91], BioAbfV [92], DepV [93]) et de la législation sur les engrais (DüMV [94], DüngG [95], DüV [96]). Les cendres de bois dont la qualité est garantie remplacent les engrais minéraux dans l'agriculture conventionnelle et biologique, permettent le chaulage d'entretien en sylviculture et contribuent ainsi à une bioéconomie durable et respectueuse des ressources. Les déchets destinés à être éliminés deviennent ainsi un produit de valeur. Les aspects économiques jouent ici un rôle décisif. Les coûts supplémentaires en personnel et en finances liés à l'assurance qualité sont compensés par les recettes générées par les engrais produits et les économies réalisées sur les modes d'élimination antérieurs, p. ex. la mise en décharge. Les usines de chaux (engrais minéraux) et les installations de compostage (engrais organo-minéraux) disposant d'une autorisation au titre de la loi fédérale sur la protection contre les émissions (BImSchG) sont prédestinées à la réception, au traitement et à la valorisation des cendres de bois.

En Allemagne, la mise en décharge dans les règles de l'art reste la filière d'élimination la plus courante pour les déchets de sciage provenant d'installations traitant du bois naturel (AVV 100101 conformément au règlement sur la liste des déchets [90]). Il s'agit généralement de décharges de classe DK II selon la DepV pour les déchets minéraux contaminés mais non dangereux, dont les exploitants sont des entreprises de gestion des déchets certifiées. Avant la remise des cendres à une entreprise de transport agréée ou en cas de livraison directe à la décharge, une analyse de déclaration du producteur de déchets doit toujours être présentée. Celle-ci est réalisée par un laboratoire spécialisé sur la base d'un échantillon de matériau prélevé sur place selon les règles de l'art. Les paramètres à déterminer, tels que les métaux lourds, les matières solides en suspension et la perte au feu (max. 5 %), sont régis par l'ordonnance sur les décharges.

Les poussières de filtration provenant d'installations traitant du bois non traité (AVV 100103 selon l'ordonnance sur la liste des déchets [90]) peuvent, s'il s'agit de cendres volantes de cyclone, être mises en décharge à ciel ouvert au cas par cas, en fonction des résultats d'analyse du matériau et de l'autorisation respective de la décharge. Cela ne s'applique pas aux fractions de déchets dangereux marquées d'un * dans l'AVV (p. ex. AVV 100118 déchets issus du traitement des gaz d'échappement contenant des substances dangereuses selon l'ordonnance sur la liste des déchets [90]). Ces cendres volantes fines provenant d'électrofiltres ou de filtres en tissu contiennent nettement plus de polluants et ne peuvent être stockées que dans des décharges souterraines (DK IV), p. ex. dans des décharges minières:

- Loi sur la gestion des déchets de 2002
- Règlement sur la liste des déchets de 2003 (codes de référence pour les personnes soumises à l'obligation d'enregistrement)

- Règlement sur le bilan des déchets (obligation d'enregistrement)
- Loi sur l'assainissement des sites contaminés
- Règlement sur le compost
- Loi sur les engrais
- Loi sur les forêts (épandage en forêt)
- Loi sur l'eau
- Interdictions d'épandage d'engrais dans le cadre des lois sur la protection de la nature des Länder
- Lois sur la protection des sols de certains Länder

Il convient de vérifier au cas par cas quelles sont les lois et les règlements à respecter dans chaque situation particulière, et si d'autres dispositions non mentionnées ci-dessus s'appliquent éventuellement. Vous trouverez ci-dessous quelques recommandations générales concernant la valorisation des cendres [80].

En principe, les cendres grossières et les cendres volantes de cyclone conviennent à la valorisation en tant qu'engrais, à condition que les valeurs limites correspondantes concernant la composition des cendres soient respectées. Les mélanges de ces fractions de cendres ne sont autorisés à la valorisation que s'ils sont déjà produits sous forme de mélange et si la composition de ce mélange respecte les valeurs limites. En raison de leur teneur élevée en métaux lourds, les cendres de filtration (cendres volantes ultrafines) ne sont généralement pas adaptées.

Les prélèvements de cendres sont obligatoires à intervalles réguliers, allant d'une fois tous les dix ans à trois fois par an, en fonction de la puissance nominale de la chaudière et de l'utilisation prévue (agricole ou forestière). Sur la base de l'analyse des cendres, les cendres de bois sont classées en différentes catégories de qualité. En fonction de la classe de qualité obtenue, les cendres de bois peuvent être épandues sans autres analyses (classe de qualité A) ou uniquement après des analyses supplémentaires du sol sur les surfaces utilisées à des fins agricoles et forestières. En vertu de l'ordonnance sur le bilan des déchets, il existe une obligation d'enregistrement de la quantité, de l'origine et de la destination des cendres sous la forme d'une déclaration électronique annuelle. Les cendres de bois utilisées comme engrais en agriculture doivent être prises en compte dans la gestion des engrais agricoles. Lors de l'épandage, les distances minimales prescrites par rapport aux cours d'eau doivent être respectées.

Pour plus d'informations, il est recommandé de consulter [80] pour un aperçu général et [99] pour des informations approfondies (y compris des organigrammes sur la mise en œuvre pratique concernant les demandes requises, les registres, etc.).

### 9.4.3 Situation en Autriche

En Autriche, les cendres de bois (cendres végétales) sont en principe considérées comme des déchets. La mise en décharge est régie par les dispositions de l'ordonnance sur les décharges de 2008. Les cendres de grille et les cendres volantes de cyclone (après abaissement du pH) peuvent être mises en décharge dans des décharges pour déchets non dangereux (décharges pour résidus ou déchets en vrac) si leur teneur en métaux lourds est inférieure aux valeurs limites légales [98]. Si les limites de métaux lourds sont dépassées, la mise en décharge n'est autorisée que dans des décharges pour déchets dangereux (décharge souterraine). Actuellement, une grande partie des cendres de bois produites en Autriche est mise en décharge. Dans la mesure où des possibilités s'offrent, les cendres de bois sont également fournies par les entreprises de gestion des déchets à l'industrie du ciment en tant qu'additif, ce qui permet de réduire les coûts d'élimination.

La valorisation des cendres de bois comme engrais sur les terres agricoles ou forestières est possible sous certaines conditions. Cependant, l'utilisation des cendres de bois n'est actuellement pas explicitement réglementée par la législation autrichienne. Il convient donc de respecter plusieurs lois et règlements:

- Loi de 2002 sur la gestion des déchets
- Décret de 2003 relatif au répertoire des déchets (désignations de référence pour les personnes soumises à l'obligation d'enregistrement)
- Règlement sur le bilan des déchets (obligation d'enregistrement)
- Loi sur l'assainissement des sites contaminés
- Règlement sur le compost
- Loi sur les engrais
- Loi sur les forêts (épandage en forêt)
- Loi sur l'eau
- Interdictions d'épandage dans le cadre des lois sur la protection de la nature des Länder
- Lois sur la protection des sols de certains Länder

Il convient de vérifier au cas par cas quelles sont les lois et les règlements à respecter dans chaque situation particulière, et si d'autres dispositions non mentionnées ci-dessus s'appliquent éventuellement. Vous trouverez ci-dessous quelques recommandations générales concernant la valorisation des cendres [80].

Les cendres grossières et les cendres volantes de cyclone peuvent en principe être valorisées comme engrais, à condition que les valeurs limites applicables à la composition des cendres soient respectées. Les mélanges de ces fractions de cendres ne sont autorisés à la valorisation que s'ils sont déjà produits sous forme de mélange et si la composition de ce mélange respecte les valeurs limites. En raison de leur teneur élevée en métaux lourds, les cendres de filtration (cendres volantes ultrafines) ne sont généralement pas adaptées.

# 10 Rentabilité

## 10.1 Question de rentabilité concernant les centrales de chauffages au bois

L'évaluation de la rentabilité des centrales de chauffage au bois soulève plusieurs questions. Les plus importantes sont les suivantes :

- À combien s'élèveront les coûts de production de chaleur ?
- Quelle est la rentabilité de la centrale de chauffage au bois par rapport à d'autres systèmes énergétiques ?
- Quels tarifs de chauffage pourra-t-on proposer aux futurs clients ?
- Quelle structure tarifaire convient-il d'adopter (frais de raccordement/abonnement/prix de mesure/prix de consommation) ?
- Quels sont les principaux risques économiques ?
- Comment évaluer l'évolution économique sur la durée d'exploitation de l'installation et compte tenu de l'évolution des conditions-cadres (par exemple, prix des combustibles, baisse des ventes de chaleur due à la rénovation thermique et au changement climatique, tarification du $CO_2$, contexte politique et social) ?

Le choix de la méthode appropriée pour l'évaluation de la rentabilité dépend de la problématique et de l'état d'avancement du projet. Au cours des premières phases du projet (étude de faisabilité), une estimation des coûts d'investissement et de production de chaleur sur la base de valeurs empiriques et indicatives est suffisante (voir également le chapitre 3.2). Les diagrammes du chapitre 10.8 permettent d'estimer, dans le cadre d'une étude de faisabilité, les coûts d'investissement pour la production et la distribution de chaleur. Les chapitres suivants présentent les méthodes appropriées et les outils applicables pour répondre aux questions ci-dessus. Il convient toutefois de clarifier au préalable la répartition des responsabilités entre les parties prenantes du projet lors de l'évaluation de la rentabilité.

## 10.2 Responsabilités

- La responsabilité principale de l'évaluation de la rentabilité d'une centrale de chauffage au bois incombe au maître d'ouvrage. En règle générale, le ou la concepteur(e) du maître d'ouvrage fournit des données fiables concernant :
- Besoins en puissance et en chaleur des clients concernés
- Pouvoir calorifique de la gamme de combustibles prévue et informations sur les coûts induits éventuels (particulièrement important pour les gammes de combustibles à bas prix)
- Coûts d'investissement
- Coûts d'entretien et de réparation
- Coûts énergétiques, comprenant les coûts de combustible et les coûts d'énergie auxiliaire (coûts liés aux besoins ou à la consommation).

Lors de la réalisation du calcul de rentabilité, le concepteur doit être en mesure de conseiller le maître d'ouvrage. Dans le cadre d'une mission supplémentaire, le concepteur peut également effectuer les calculs de rentabilité à la place du maître d'ouvrage. Dans tous les cas, c'est toutefois au maître d'ouvrage qu'il revient de décider des hypothèses de base à retenir pour le calcul de rentabilité. Parmi celles-ci figurent :

- Taux d'intérêt de calcul
- Durée de vie des installations techniques
- Taux d'inflation (taux de hausse des prix)
- Augmentation des coûts d'exploitation
- Prix de l'énergie : pour les centrales de chauffage au bois, cela inclut également le choix de la gamme de combustibles et le prix des combustibles qui en résulte.
- Augmentations des prix de l'énergie
- Évolution des besoins en chaleur en fonction du taux de rénovation des consommateurs de chaleur ou des extensions et densifications du réseau de chaleur.

Il est recommandé de consigner ces principes de base par écrit.

Si un réseau de chauffage prévu doit approvisionner différents clients en chaleur, les responsabilités entre le maître d'ouvrage et le concepteur doivent être réparties comme suit :

**Maître d'ouvrage**

- Principal responsable du calcul de rentabilité. Doit vérifier ce calcul ainsi que les données de base qui le sous-tendent et les analyser de manière critique.
- Déterminer quels clients potentiels doivent être pris en compte
- Déterminer la date de raccordement à retenir (ce qui influe sur la date à laquelle les coûts d'investissement seront engagés et sur les recettes attendues de la vente de chaleur).

**Planificateur/Planificatrice**

- Chargé de déterminer avec précision les besoins en puissance thermique, y compris la courbe de charge et les besoins annuels en chaleur prévisibles des clients potentiels
- Chargé de déterminer les coûts d'investissement liés au raccordement des clients potentiels

## 10.3 Structure des coûts des centrales de chauffage au bois

Conformément à la directive VDI 2067 [100], les quatre catégories de coûts suivantes sont prises en compte lors du calcul des coûts des installations techniques du bâtiment :

- Coûts liés aux immobilisations (y.c. les travaux d'entretien et de rénovation)
- Coûts liés à la consommation
- Coûts d'exploitation
- Autres coûts

Le tableau 10.1 présente la répartition des différentes natures comptables dans ces groupes de coûts pour une centrale de chauffage au bois.

- Pour certaines catégories de coûts, le calcul de rentabilité repose sur des estimations basées sur des valeurs de référence, par exemple sous forme de pourcentage du montant de l'investissement ou de la quantité de chaleur produite. Il convient alors de définir clairement quelles catégories de coûts sont affectées aux différents groupes de coûts. Selon la norme VDI 2067 [100], la maintenance désigne la mise en œuvre de mesures visant à préserver et à rétablir l'état de référence et comprend les types de coûts « réparation », « entretien » et « inspection » :
- **Remise en état** (généralement appelée « entretien » en Suisse): mesures visant à rétablir l'état initial
- **Maintenance**: mesures visant à préserver l'état initial
- **Inspection**: mesures visant à constater et à évaluer l'état actuel

Tableau 10.1 Catégories et types de coûts d'une centrale de chauffage au bois. Principes de base et valeurs indicatives pour le calcul des coûts annuels. Il faut noter que, contrairement à la norme VDI 2067 [100], les coûts de maintenance sont inclus dans les frais de personnel. Les indications entre parenthèses () se réfèrent à la directive ÖKL 67 [101].

| Groupe de coûts- | Catégorie de coûts | Base de calcul des coûts annuels | Valeurs indicatives |
|---|---|---|---|
| Coûts du capital | Coût du capital des équipements et des installations immobilières (investissements) | Montants des investissements par corps de métier, durée d'utilisation, taux d'intérêt | Durée d'utilisation : voir tableau 10.2<br>Intérêts : conforme aux directives du maître d'ouvrage ou des institutions de financement (subvention conformément à [101])) |
| | Coûts de remise en état (réparations conformément à la norme VDI 2067 [100])) | Montants des investissements par corps de métier, pourcentage du montant total des investissements | Voir le tableau 10.2 |
| Coûts liés à la consommation | Coûts de combustible | Consommation annuelle et pouvoir calorifique ou consommation de combustible, prix du combustible | Prix effectifs basés sur les offres<br>(plus un prix minimum de 23 € par MWh d'énergie brute, calculé sur la base du pouvoir calorifique Hu, conformément à [101]) |
| | Énergie auxiliaire (électricité) pour la production et la distribution de chaleur | Pourcentage de la quantité de chaleur (produite ou distribuée) × prix de l'électricité | pour la production de chaleur : 1 à 1,5 % de la quantité de chaleur produite<br>pour le réseau de chaleur : 0,5 à 1 % de la quantité de chaleur distribuée<br>(min. 1,5 % par rapport à la quantité de chaleur produite ; 2 % pour les installations équipées d'un système de récupération de chaleur des gaz d'échappement ou d'un séparateur électrique conformément à [101]) |
| | Fuel et consommables pour la production de chaleur (p.ex .pour les installations SNCR) | Prix, quantité consommée | estimer les coûts réels |
| | Élimination des cendres | Type de combustible utilisé, teneur en cendres, mode d'élimination | estimer les coûts réels<br>(évent. inclus dans le prix du combustible) |
| Coûts liés à l'exploitation | Frais de personnel (pour le service, le nettoyage, l'entretien et les inspections, hors administration) | Pourcentage des coûts d'investissement liés à la production de chaleur | 1,5 % des coûts d'investissement liés à la production de chaleur (au moins 2,5 à 5 € par MWh de chaleur produit, selon [101]) |
| | Loyers, fermages<br>Redevances de concession | au cas par cas | estimer les coûts réels |
| | Ramoneur, contrôle des gaz d'échapp., mesure des émissions | au cas par cas | estimer les coûts réels |
| Autres Frais | Assurances, impôts, taxes générales, frais administratifs | Pourcentage du montant total de l'investissement | 0,5 à 1,5 % de l'investissement total |

Le tableau 10.1 donne un aperçu des types de coûts et indique quelles données de base doivent être utilisées pour le calcul. Des valeurs indicatives sont également fournies dans certains cas. Celles-ci peuvent être utilisées aussi bien pour le calcul de rentabilité selon la méthode des annuités que pour l'établissement d'un bilan prévisionnel et d'un compte de résultat prévisionnel. Les valeurs indicatives fournies ne doivent pas être reprises telles quelles par le planificateur sans avoir été vérifiées. Étant donné que les coûts spécifiques (indiqués par exemple en coûts/MWh) dépendent en partie de la taille de l'installation et/ou du nombre d'heures de fonctionnement à plein régime, il convient de vérifier au cas par cas si une valeur indicative peut être utilisée et à quel niveau elle doit être fixée. Pour l'Autriche, la fiche technique n° 67 de l'ÖKL [101] fournit des indications spécifiques. Il s'agit essentiellement de valeurs minimales qui ne doivent pas être inférieures.

La durée d'utilisation à retenir pour le calcul de rentabilité doit être déterminée en concertation avec le maître d'ouvrage et, le cas échéant, avec les institutions financières concernées (banques, organismes de financement, etc.). Lors de la détermination de la durée d'utilisation, il convient de noter que celle-ci ne dépend pas nécessairement de la durée de vie technique. La durée d'utilisation est également influencée par l'évolution des besoins et les progrès technologiques. De plus, lors de rénovations, ce ne sont généralement pas des éléments isolés, mais plusieurs composants qui sont remplacés simultanément, que chaque élément ait atteint ou non sa durée de vie technique.

Tableau 10.2 Valeurs indicatives concernant la durée de vie et les coûts de remise en état

| Corps de métier | Durée d'utilisation<br>Années | Coûts de réparation spécifiques<br>% |
|---|---|---|
| Éléments d'installation spécifiques au bois* | 20 | 3.0 |
| Éléments de l'installation spécifiques aux pics de charge* | 20 | 2.0 |
| Hydraulique | 20 | 2.0 |
| Installations électriques et domotiques | 20 | 2.0 |
| Bâtiments et viabilisation | 50 | 1.0 |
| Réseau principal (y.c. canalisations et les travaux de terrassement) | 40 | 1.0 |
| Station de transfert de chaleur | 30 | 2.0 |
| Véhicules | 15 | 3.0 |
| Planification** | moyenne | - |

* régulation et commande comprises

** la durée d'utilisation moyenne pour la conception doit être pondérée par les coûts de conception des différents corps de métier, ou bien les coûts de conception doivent être imputés aux différents corps de métier

La directive VDI 2067 [100] contient des informations plus détaillées et, en partie, différentes de celles du tableau 10.2. Pour les calculs selon la norme VDI, il convient d'utiliser les données issues de la directive VDI 2067.

## 10.4 Analyse de rentabilité

### 10.4.1 Introduction

Le calcul de rentabilité permet de déterminer les coûts de production et de distribution de la chaleur, les coûts d'investissement ainsi que les coûts d'exploitation et d'entretien. Une comparaison des différentes options permet de mettre en parallèle les coûts de divers systèmes de chauffage ou variantes de conception. Le calcul de rentabilité sert également de base à la fixation et à la tarification de la vente de chaleur.

Pour comparer les différentes options, il convient de déterminer non seulement les coûts d'investissement, mais aussi les coûts de production de chaleur de chaque option. La comparaison des coûts de production de chaleur permet d'effectuer une comparaison des coûts globaux sur toute la durée de vie de l'installation. Le calcul des coûts de production de chaleur selon la méthode des annuités est couramment utilisé dans la pratique et est décrit au chapitre 10.4.2.

Pour pouvoir évaluer la rentabilité d'un réseau de chauffage, il convient de calculer les coûts et les recettes sur plusieurs années. La méthode de la valeur actuelle nette (méthode VAN) est particulièrement adaptée à cet effet, car elle permet de calculer le taux de rendement effectif (interne) (TRI) de l'investissement. L'outil de rentabilité de QM Chauffages au bois repose sur la méthode du taux de rendement interne (voir chapitre 10.7).

Pour l'analyse des systèmes énergétiques, qui ont généralement une longue durée de vie et pour lesquels l'augmentation des prix et d'autres changements futurs des données d'entrée revêtent donc une importance particulière, il est recommandé d'utiliser des **méthodes de calcul dynamiques**. Dans ces méthodes, les changements attendus au cours de la période considérée sont estimés ou déterminés à partir de moyennes statistiques afin de pouvoir prévoir les coûts annuels pour toute la durée de vie de l'installation. Les **méthodes de calcul statiques**, en revanche, ne prennent en compte que les conditions existant au moment de l'analyse de rentabilité. Pour des périodes d'analyse qui s'étendent généralement sur au moins 15 ans, il peut en résulter des écarts significatifs par rapport aux méthodes dynamiques. Souvent, les méthodes dynamiques peuvent reposer sur des hypothèses simplifiées, de sorte que des formules de somme simples peuvent être utilisées pour le calcul de rentabilité et que la charge de calcul n'est donc pas beaucoup plus importante que pour les méthodes statiques.

Les principales méthodes de calcul dynamique sont :

- Méthode de la valeur actuelle nette
- Méthode des annuités
- Méthode de la valeur actualisée.

### 10.4.2 Calcul des coûts de chauffage à l'aide de la méthode des annuités

Pour le calcul des coûts de production de chaleur, on utilise généralement la méthode des annuités. Celle-ci est décrite en détail dans la directive VDI 2067 [100]. La méthode des annuités permet de déterminer les coûts annuels moyens encourus pendant la période considérée. Les coûts annuels se composent des coûts d'investissement, d'exploitation et d'énergie. Dans les coûts d'investissement (I • a), l'investissement est amorti et remboursé sur la durée d'utilisation (durée de vie de l'installation). Les coûts d'exploitation se composent des coûts de maintenance et de personnel. Les coûts énergétiques résultent de la consommation d'énergie prévue, y compris l'énergie auxiliaire, par source d'énergie. Les coûts annuels d'exploitation et d'énergie A sont ajoutés aux coûts d'investissement en tenant compte de leur évolution possible (d • a).

Étant donné que les postes de coûts déterminants pour le coût de production de la chaleur dépendent fortement du pays ou de la région, de l'emplacement, des conditions générales, du mode de construction, des structures salariales, des prix de l'énergie, des interfaces, etc., nous avons délibérément choisi de ne pas indiquer de valeurs indicatives. Il est souvent plus utile de comparer le coût de production de la chaleur à celui d'autres solutions dans le cadre d'une analyse comparative des différentes options.

Calcul des **coûts annuels K** selon [102] :

$$K = I * a + A * d * a$$

K Coûts annuel [EUR/a; CHF/a]

I Coûts d'investissement (par poste) [EUR; CHF]

A Coûts d'exploitation annuels [EUR/an ; CHF/an] :
- Frais d'entretien et de réparation
- Coûts énergétiques (combust. et énergie auxiliaire)
- Autres coûts

a Facteur d'annuité [-], calculé à partir de :

$$\text{si } i = 0 : a = \frac{1}{n} \text{ ; si } i > 0 : a = \frac{i * (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

d Facteur d'actualisation global (également appelé facteur de valeur actuelle d'une rente) [–], calculé à partir de :

$$d = \frac{(1+i-e)^n - 1}{(1+i-e)^n * (i-e)}$$

i Taux d'intérêt de calcul [-]

n Durée considérée (durée d'utilisation) [-]

e hausse générale des prix, taux d'inflation [-]

La durée d'utilisation et les coûts de maintenance peuvent être déterminés conformément au tableau 12.2. La durée d'utilisation à retenir peut toutefois également être fixée par le maître d'ouvrage, un établissement de crédit (banque) ou un éventuel organisme de financement

Dans de nombreux cas, il est possible d'appliquer les simplifications suivantes par rapport à la méthode décrite en détail dans la norme VDI 2067 :

- Les investissements ne sont effectués qu'au début de la période considérée.
- La période considérée correspond à la durée de vie des investissements. Cela signifie qu'aucun renouvellement n'est nécessaire pendant cette période et qu'il ne reste plus aucune valeur résiduelle à la fin de celle-ci.

Si la durée d'utilisation ne correspond pas à la période considérée, il convient d'en tenir compte comme suit :

- Si la durée d'utilisation est inférieure à la période considérée, il convient de prendre en compte l'investissement de remplacement en conséquence (en ajoutant la valeur actualisée de l'investissement initial).
- Si, à la fin de la période considérée, la durée d'utilisation n'est pas encore écoulée, l'investissement I est réduit de la valeur actualisée de la valeur résiduelle.

En divisant les coûts annuels par la chaleur utile moyenne prévue produite chaque année, on obtient le **coût de production de la chaleur k**

$$k = \frac{K}{Q_{utile}}$$

k Coûts de production de chaleur [EUR/MWh; CHF/MWh]

K Coûts annuels [EUR/a; CHF/a]

$Q_{utile}$ Chaleur utile produite chaque année [MWh/a] (dans les réseaux de chaleur, les coûts de production de chaleur peuvent également être rapportés à la chaleur utile fournie)

Le calcul du coût de production de la chaleur selon la méthode des annuités est par exemple également intégré à l'outil de calcul de rentabilité « QM Chauffages au bois » (voir chapitre 10.7) ou au logiciel open source Sophena [103]. De plus, de nombreux concepteurs et planificateurs ont développé, pour le calcul de rentabilité, des outils dans des tableurs permettant de calculer les coûts de production de chaleur selon la méthode des annuités.

Dans la pratique, la méthode des annuités est souvent simplifiée en utilisant le taux d'intérêt actuel des crédits bancaires et des prêts comme taux d'intérêt de calcul et en ne tenant pas compte de la hausse des prix (inflation). La méthode des annuités devient ainsi une analyse statique qui ne tient pas compte des évolutions futures. Cela peut entraîner des erreurs considérables dans le cas de systèmes présentant des structures de coûts différentes. Toutefois, si les parts des types de coûts liés au capital sont d'un niveau similaire et qu'une hausse des prix d'intensité égale peut être supposée pour tous les types de coûts liés à la consommation et à l'exploitation sur l'ensemble de la durée d'utilisation, une comparaison des systèmes utilisant le taux d'intérêt actuel et ne tenant pas compte de la hausse des prix est suffisamment significative dans le cadre d'une étude préliminaire.

Cette méthode ne suffit généralement pas à elle seule pour déterminer si l'installation choisie, et donc le projet en question, peut être exploitée de manière rentable. Afin d'évaluer la situation économique sur toute la durée de vie de l'installation, il convient toujours d'établir un plan d'affaires pour une installation raccordée à un réseau de chaleur et d'examiner son évolution économique sur plusieurs années (voir chapitres 10.6 et 10.7).

### 10.4.3 Méthode de la valeur actuelle nette (VAN) et taux de rendement interne (TRI)

La méthode des annuités décrite au chapitre 10.4.2 permet de calculer le coût moyen sur toute la durée du projet. Étant donné que les investissements dans les centrales de chauffage au bois ont généralement une longue durée de vie et ne s'amortissent qu'au fil des années, il est judicieux d'évaluer la rentabilité sur une période plus longue. La méthode de la valeur actuelle nette (en anglais: Net Present Value, NPV) est particulièrement adaptée à cet effet; elle permet également de calculer le taux de rendement interne (en anglais: internal rate of return, IRR) de l'investissement. L'outil d'analyse de rentabilité présenté au chapitre 10.7 utilise ces méthodes.

Le taux de rendement interne désigne le taux de rendement moyen du capital investi sur toute la durée d'exploitation. Le calcul tient compte des fluctuations des recettes (vente de chaleur) et des dépenses (coûts énergétiques, entretien) et permet de déterminer un rendement annuel moyen. On recherche le taux d'intérêt pour lequel la valeur actuelle nette est égale à zéro au moment du calcul [104].

$$I_0 = \sum_{t=1}^{n} \frac{e_t - a_t}{(1+i)^t} + \frac{L_n}{(1+i)^n}$$

- $t$ Indice temporel, où t = 1, 2, …, n
- $n$ Durée d'utilisation de l'investis. en années
- $i$ Taux d'actualisation (taux d'intérêt de calcul)
- $I_0$ Dépenses liées à l'acquisition de l'actif d'investissement, par exemple le prix d'achat d'une machine
- $a_t$ Paiements effectués pendant la durée d'utilisation, dus à la fin de chaque période t, tels que les paiements liés aux combustibles, aux salaires et à l'entretien
- $e_t$ Encaissements survenant au cours de la durée d'utilisation, exigibles à la fin de la période t correspondante, tels que les recettes provenant de la vente d'énergie
- $L_n$ Produit de liquidation à la fin de la durée d'utilisation

Pour déterminer le taux de rendement interne, il faut résoudre l'équation ci-dessus en fonction de i. Dans le cas de projets d'investissement s'étendant sur plus de deux périodes d'exploitation, cela pose des difficultés mathématiques considérables, ce qui oblige à recourir à des solutions approximatives. La procédure est la suivante [104] :

- On détermine un taux d'actualisation i tel que la valeur actuelle nette ainsi calculée soit aussi proche que possible de zéro, tout en restant positive.
- On détermine ensuite un deuxième taux d'actualisation i tel que la valeur actuelle nette ainsi calculée soit également aussi proche que possible de zéro, mais qu'elle soit négative.
- À partir de ces deux valeurs, on calcule par interpolation le taux d'actualisation pour lequel la valeur actuelle nette est exactement égale à zéro.

Les tableurs modernes tels qu'Excel disposent de fonctions qui simplifient ces calculs.

**Si le taux de rendement interne calculé pour un investissement est supérieur au taux d'actualisation, l'investissement est considéré comme rentable. À l'inverse, un investissement est considéré comme non rentable si le taux de rendement interne est inférieur au taux d'actualisation.**

### 10.4.4 Comparaison des variantes

Pour déterminer le coût de production de la chaleur d'une centrale de chauffage au bois, on peut appliquer la méthode décrite au chapitre 10.4.2. Il convient alors de distinguer si l'on doit calculer le coût de production de la chaleur de la première année d'exploitation (hausse des prix non prise en compte) ou le coût moyen de production de la chaleur sur la période considérée (approche nominale). Seule l'approche nominale garantit que le coût moyen de la chaleur sur la période considérée est déterminé avec la plus grande précision possible.

Lors de la **comparaison des différentes options d'une centrale de chauffage au bois**, les simplifications décrites ci-dessous peuvent être utilisées.

Le taux d'intérêt réel correspond à la rémunération excédant le taux d'inflation général et correspond approximativement à la différence entre le taux d'intérêt et le taux d'inflation.

**Exemple:** si le taux d'intérêt nominal est de 3 % et que l'inflation générale est de 1 %, le taux d'intérêt réel s'élève à 2 %. En Suisse, le taux d'intérêt réel se situe en moyenne, sur le long terme, entre 1 % et 3 %.

On part également du principe que le remplacement des installations à l'issue de leur durée d'utilisation s'effectue à des prix réels identiques à ceux de l'investissement initial. Chaque catégorie de coûts d'investissement est amortie sur sa durée d'utilisation (voir tableau 10.2).

Cette analyse rend correctement compte des rapports entre les différentes options de production de chaleur comparées. Il convient toutefois de noter que les coûts de production de chaleur calculés peuvent s'écarter des coûts réels en raison des simplifications opérées dans le calcul.

**Si l'on ne tient pas compte de l'inflation lors de la comparaison des coûts de production de chaleur de différents systèmes de chauffage, il convient d'utiliser le taux d'intérêt réel comme taux d'actualisation.**

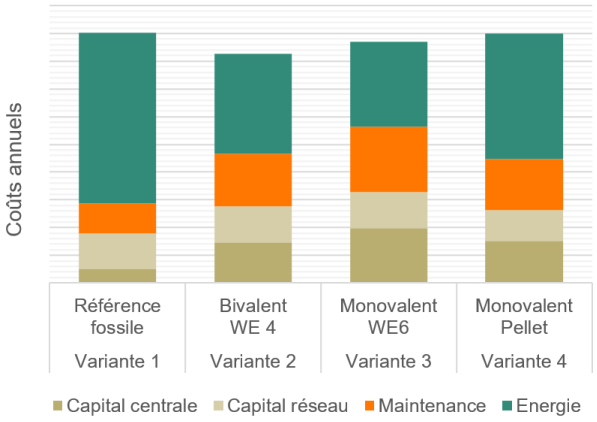



Figure 10.1 Exemple de répartition des coûts annuels entre coûts d'investissement, coûts d'exploitation, coûts d'entretien et coûts énergétiques.

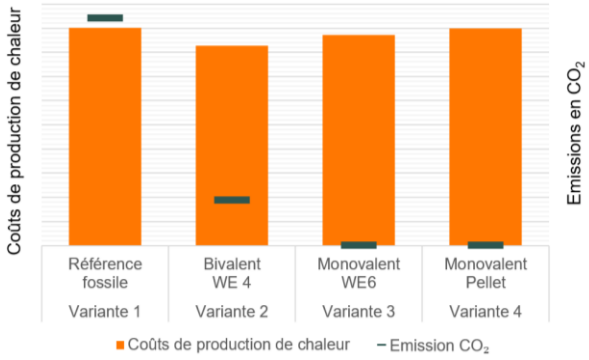



Figure 10.2 Exemple de comparaison entre les coûts de chauffage et les émissions de CO2.

### 10.4.5 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité permet de mettre en évidence l'influence des variations de certains paramètres d'entrée sur les résultats de la comparaison des variantes et d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- Quelles variables d'entrée ont une influence particulièrement forte sur la valeur de la variable de résultat ?
- Dans quelles limites les valeurs des variables d'entrée peuvent-elles fluctuer sans compromettre la réussite de l'entreprise ?

Il est ainsi possible, par exemple, de calculer l'impact des dépassements de coûts d'investissement, d'une baisse des ventes de chaleur ou encore de l'influence de la fluctuation des prix de l'énergie, des taxes et des impôts sur le prix de revient de la chaleur.

La figure 10.3 présente différents facteurs pour les divers coûts énergétiques. Les énergies fossiles et l'électricité sont considérées comme critiques et leur volatilité est prise en compte avec une fourchette de – 10 % à + 20 %. La volatilité du bois-énergie est en revanche estimée plus faible (- 5 %/+ 10 %). Il apparaît ainsi que, grâce à des coûts énergétiques plus stables, les coûts annuels des systèmes de production de chaleur renouvelables varient nettement moins que ceux des combustibles fossiles.

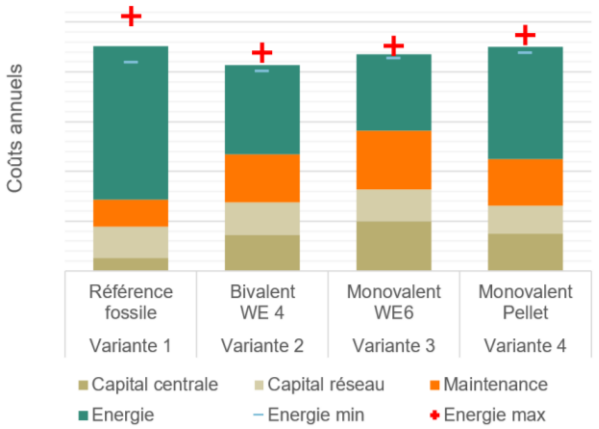



Figure 10.3 Coûts annuels avec analyse de sensibilité « prix de l'énergie ».

La figure10.4 présente l'analyse de sensibilité (+ 20 % / - 10 %) sur la base des coûts d'investissement. En raison des investissements nettement plus élevés des variantes renouvelables, les coûts d'investissement varient beaucoup plus que dans le cas de la variante de référence.

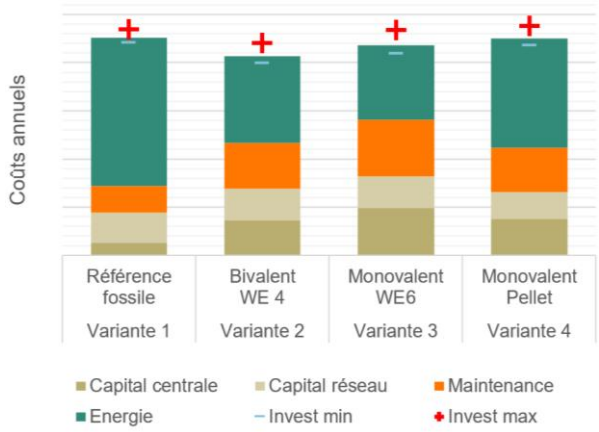



Figure 10.4 Coûts annuels avec analyse de sensibilité « Coûts d'investissement ».

## 10.5 Structure tarifaire de la vente de chaleur

Les coûts énumérés au chapitre 10.3 doivent être intégrés en conséquence dans la structure tarifaire pour la vente de chaleur. Il est judicieux de les répartir en coûts liés à la consommation et en coûts indépendants de la consommation. Les investissements ainsi que les coûts d'entretien et de maintenance sont largement indépendants des ventes de chaleur. Les dépenses liées à l'achat de combustibles et les coûts d'électricité pour l'énergie auxiliaire dépendent de l'énergie produite et constituent donc des coûts liés à la consommation.

La structure tarifaire du chauffage urbain se compose souvent de trois ou quatre éléments:

- **Frais de raccordement uniques**: part des coûts d'investissement à la charge du consommateur de chaleur pour la construction et les frais de raccordement au réseau. Le paiement s'effectue en une seule fois, généralement après l'achèvement du raccordement.

- **Prix de base annuel** par kW de puissance souscrite: le prix de base sert à facturer les coûts fixes indépendants de la consommation. En fonction des frais de raccordement, une partie des coûts d'investissement doit également être répercutée sur le prix de base sous forme de coûts d'investissement.
- **Prix de l'énergie**: coûts énergétiques liés à la chaleur fournie, facturés sur la base du compteur de chaleur étalonné de la clientèle. Outre les coûts de combustible, le prix de l'énergie doit également inclure les coûts de l'énergie auxiliaire et des pertes de réseau, ainsi que d'autres coûts liés à la consommation.
- **Prix de mesure**: la structure tarifaire peut en outre inclure un prix de mesure couvrant les coûts des dispositifs de mesure ainsi que leur entretien et leur étalonnage. La part du prix de mesure dans le montant total du tarif est faible.

Les prix récurrents (prix de base et prix de l'énergie) sont souvent indexés et ajustés périodiquement (par exemple, chaque année). Selon le pays et la région, il existe une multitude d'indices de prix qui couvrent, par exemple, l'évolution des prix à la consommation, des prix de l'énergie (fioul, gaz, électricité, énergie ou bois de chauffage), des coûts de personnel ou des coûts de construction. Par exemple, l'indexation du prix de la main-d'œuvre peut s'effectuer à l'aide d'un indice des prix de l'énergie ou des combustibles, et celle du prix de base à l'aide d'un indice général des prix à la consommation (indice des prix à la consommation).

Les clauses de révision des prix doivent être formulées de manière à tenir compte de façon appropriée tant de l'évolution des coûts liés à la production et à la fourniture de chaleur par l'entreprise que de la situation du marché de la chaleur. Elles doivent indiquer de manière exhaustive et sous une forme compréhensible par tous les facteurs de calcul déterminants [105].

La structure tarifaire, la méthode de calcul des différents éléments de prix et l'indexation des prix doivent être définies de manière exhaustive et détaillée dans le contrat de fourniture de chaleur ou dans une annexe jointe (p.e. une grille tarifaire). En cas de prix indexés, il convient de préciser, outre le prix de base, le nom, l'année de référence et les sources de l'indice ou des indices, le seuil à partir duquel les ajustements prennent effet, ainsi que les formules de calcul. À cet égard, toutes les lois, prescriptions et directives relatives à la conception des prix et des contrats de fourniture et de facturation d'énergie doivent être respectées. Afin de garantir la sécurité juridique d'un contrat de fourniture de chaleur, il est recommandé de faire appel aux conseils juridiques de cabinets d'avocats expérimentés en la matière (même pour les petites installations ne comptant que quelques consommateurs de chaleur). Le contrat de fourniture de chaleur et les conditions techniques de raccordement qu'il contient doivent être conçus de manière à offrir des incitations et des possibilités juridiques permettant d'optimiser le comportement de charge ainsi que les températures d'aller et de retour. À cette fin, on recourt de plus en plus à ce que l'on appelle des « tarifs incitatifs ». Ceux-ci prennent en compte, lors de la facturation, par exemple la température de retour ou un débit volumique spécifique, afin de calculer en fonction de cela un bonus ou un malus sur le prix de la chaleur. De plus amples informations sur les contrats de fourniture de chaleur sont disponibles dans le manuel de planification du chauffage à distance [19].

La figure 10.5 présente la répartition des coûts d'un réseau de chauffage dans la structure tarifaire. Cette répartition est propre à chaque cas et doit être définie par l'exploitant de l'installation. Si, par exemple, on renonce à des frais de raccordement uniques, l'ensemble des coûts d'investissement, y compris la part de risque, doit être capitalisé et intégré dans le prix de base.

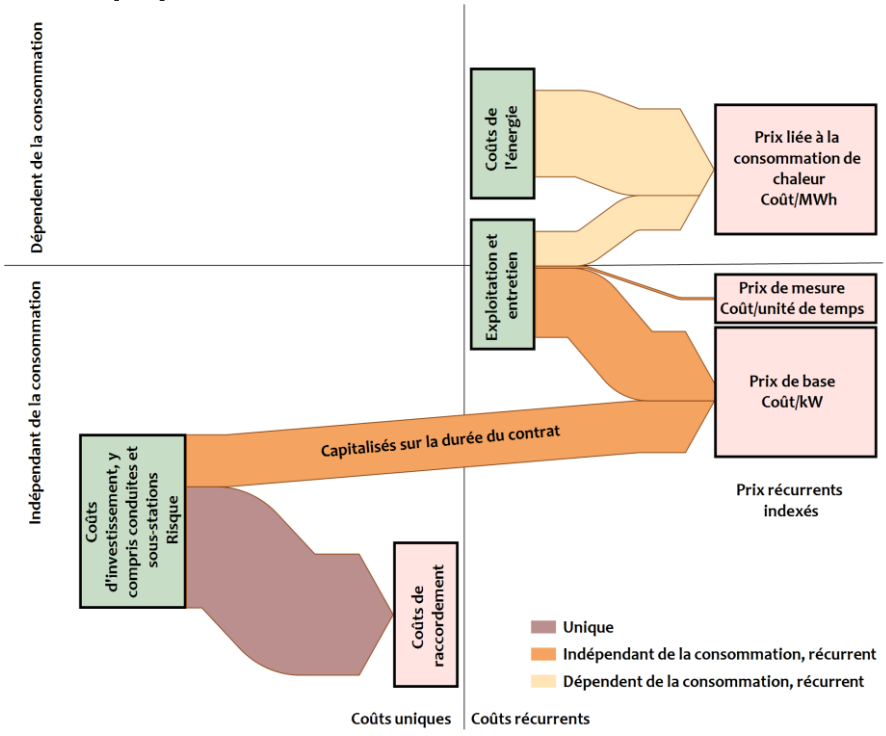



Figure 10.5 Répartition des coûts selon la structure tarifaire.

## 10.6 Plan d'affaires

### 10.6.1 Structure et contenu

Le business plan décrit un concept ou un projet d'entreprise, et donc une idée commerciale destinée à être mise en œuvre au sein d'une entreprise. La construction et l'exploitation d'une centrale de chauffage au bois – en particulier d'un réseau de chauffage – constituent également, en ce sens, une entreprise et nécessitent un business plan. Un business plan est donc également un outil qui renseigne sur la qualité d'une entreprise. Un bon business plan facilite le financement et l'acquisition de clients dans le domaine du chauffage. Dans le cadre des explications suivantes, le business plan comprend un document composé des deux parties suivantes:

**1. Partie textuelle**: Il s'agit du **business plan**, qui consiste en une description écrite du concept d'entreprise en termes de produit, de service, de clientèle et de marketing. Le business plan fournit des informations sur le développement de l'entreprise et permet d'évaluer les risques.

Dans le cas d'un réseau de chauffage, il est important de mettre en évidence les implications des différentes options d'extension du réseau.

**2. Partie financière:** le bilan prévisionnel et le compte de résultat prévisionnel fournissent des informations sur les recettes et les dépenses prévues, les subventions, le financement et la gestion de la trésorerie. Le bilan prévisionnel et le compte de résultat prévisionnel couvrent généralement une période d'au moins 20 ans.

Le plan d'affaires doit aborder les éléments suivants dans ces deux parties :

- Résumé (deux pages maximum)
- Entreprise : équipe fondatrice, profil de l'entreprise, objectifs de l'entreprise
- Produit ou service : avantages et bénéfices pour les clients, état d'avancement du développement, fabrication
- Secteur et marché : analyse du secteur, analyse et segmentation du marché, clientèle cible, concurrence, analyse de l'implantation
- Marketing : entrée sur le marché, stratégie marketing et commerciale, promotion des ventes
- Direction et personnes clés
- Plan de mise en œuvre
- Opportunités et risques
- Partie financière : prévisions pour les 20 à 25 prochaines années : planification des effectifs, planification des investissements et des amortissements, compte de résultat prévisionnel, planification de la trésorerie, présentation des besoins financiers
- Analyse de sensibilité en complément de l'analyse de rentabilité, qui permet, en faisant varier les principaux paramètres d'entrée, de répondre aux questions suivantes :
  - Quels sont les paramètres d'entrée qui influencent le plus fortement le résultat ?
  - Dans quelles limites les valeurs des paramètres d'entrée peuvent-elles fluctuer sans compromettre la réussite de l'entreprise ?
- Parmi les principaux paramètres, on peut citer:
  - Part des fonds externes et intérêts sur les capitaux empruntés
  - Prix du combustible (et sécurité d'approvisionnement)
  - Coûts de construction et d'installation
  - Prix de l'électricité
  - Coûts de personnel
  - Subventions

En principe, le plan d'affaires doit être rédigé par le maître d'ouvrage. D'une part, c'est lui qui est responsable du concept commercial et, d'autre part, c'est la meilleure base pour présenter le plan d'affaires à l'extérieur. Le rôle du planificateur est d'assister le maître d'ouvrage dans l'élaboration du plan d'affaires.

### 10.6.2 Bilan prévisionnel et compte de résultat provisionnel

L'évaluation de la rentabilité d'une entreprise ne peut se fonder uniquement sur le calcul du coût moyen de production de la chaleur. Même si, sur une période d'observation prolongée, les coûts de production de la chaleur sont inférieurs aux recettes, il n'est pas possible de compenser les pertes éventuelles des premières années d'exploitation par les bénéfices des années suivantes si la trésorerie nécessaire n'est pas assurée. Il convient donc d'accorder une attention particulière à la situation de trésorerie, ce à quoi servent le bilan prévisionnel et le compte de résultat prévisionnel, accompagnés d'une justification de la situation économique pour chaque année.

Le chapitre 10.7 présente un outil basé sur Excel, développé par QM Chauffages au bois, qui permet de modéliser la situation économique d'un réseau de chauffage sur une période de 25 ans.

**Les conditions générales**, telles que la structure et la densité de raccordement du réseau de chauffage, ont une incidence sur la rentabilité. Ces données doivent être recueillies par le planificateur, de sorte que sa participation au processus d'optimisation économique est tout à fait pertinente.

**L'examen** de la rentabilité et des prévisions financières correspondantes ne devrait pas se limiter à une seule fois après l'élaboration du projet. Au contraire, le calcul de rentabilité devrait être régulièrement mis à jour et vérifié tout au long du projet en fonction des coûts réels, et complété par une analyse des possibilités d'optimisation des coûts**.**

Il convient de tenir compte de l'inflation lors du **calcul du bilan** prévisionnel et du compte de résultat prévisionnel pour chaque année. L'approche réelle simplifiée (voir chapitre 10.4) n'est toutefois pas applicable dans ce cas, car la différence entre le taux d'intérêt réel et le taux d'intérêt bancaire devient importante lorsque le taux d'inflation est élevé. Cela entraîne une charge d'intérêts proportionnellement plus élevée au cours des premières années. L'utilisation du taux d'intérêt réel peut donc conduire, surtout au cours des premières années, à une sous-estimation des coûts du capital, avec le risque que cela implique.

Si **l'inflation** n'est pas prise en compte en utilisant un taux d'intérêt nominal hors hausse des prix, la charge d'intérêts figurant dans le compte de résultat prévisionnel sera légèrement supérieure aux recettes par rapport à ce qu'elle sera en réalité par la suite. En cas de faible inflation, cet écart peut être négligé par rapport à d'autres incertitudes. Étant donné que l'inflation a une incidence tant sur les dépenses que sur les recettes, elle est généralement négligeable par rapport à d'autres incertitudes. Les hypothèses relatives aux taux d'intérêt et à l'inflation doivent être discutées et convenues avec les établissements de crédit.

## 10.7 Outil de calcul de rentabilité des centrales de chauffage au bois QM

QM Chauffages au bois a développé pour la Suisse un outil simple («Outil de calcul de rentabilité QMB») permettant d'établir un bilan prévisionnel et un compte de résultat prévisionnel sur une durée d'exploitation de l'installation de 25 ans. Cet outil s'appuie sur un programme de calcul de rentabilité créé et proposé par l'équipe autrichienne de QM Chauffages au bois [106]. Cet outil permet de visualiser l'évolution des coûts, les goulots d'étranglement économiques et la réussite du projet. Il permet notamment de répondre aux questions suivantes Les données des consommateurs de chaleur sont saisies dans la feuille de calcul E3_Consommateurs. Le tableau permet de saisir les données de raccordement pour chaque consommateur de chaleur. Les données générales et les besoins en chaleur peuvent être repris du tableau Excel « Relevé de situation » ou saisis manuellement. Il est important de noter que, pour la puissance souscrite, ce n'est pas la puissance calculée qui doit être saisie, mais la puissance convenue contractuellement. À partir des données de consommation et des tarifs, il est possible de calculer les coûts annuels et le prix de revient de la chaleur du point de vue des clients, ou les recettes issues de la vente de chaleur du point de vue de l'entreprise de fourniture de chaleur :

- Comment le projet évolue-t-il tout au long de sa durée d'exploitation ?
- Quels sont les risques économiques ?
- Les capitaux empruntés sont-ils garantis par la valeur résiduelle de l'installation ?
- À combien s'élèvent les coûts de production de chaleur pour les clients ?

La version actuelle du modèle Excel et les fichiers d'exemple se trouvent dans la section Téléchargements du site de QM Chauffages au bois [17]

L'outil Excel *QMB-Calcul de rentabilité* comporte plusieurs feuilles de calcul. Ces feuilles sont protégées en écriture, mais toutes les formules et tous les calculs restent visibles. Il convient de noter que toute modification apportée à ces feuilles peut entraîner des erreurs à d'autres endroits et, par conséquent, fausser les résultats fournis par l'outil.

Au lieu d'un manuel ou d'un guide, l'outil est décrit dans la fiche de travail **I1_Explications**. Les champs de saisie et d'affichage sont liés aux explications correspondantes.

La fiche de travail **E1_Données du projet** sert à saisir les infos relatives à l'ensemble du projet. Il s'agit notamment:

- Données générales du projet, pertes sur le réseau et autres
- Prix de l'énergie et répartition, coûts d'exploitation, renchérissement
- Coûts d'entretien
- Coûts d'investissement, y compris la durée de vie utile
- Financement externe, prêts et crédits (y compris la durée et le taux d'intérêt)
- Subventions.

**Clause de non-responsabilité**

L'outil Excel QMB-Calcul de rentabilité a été élaboré avec le plus grand soin ; toutefois, les personnes et institutions ayant participé à son élaboration ne peuvent assumer aucune garantie quant aux résultats obtenus et aux conclusions qui en découlent. En raison des simplifications opérées, certaines divergences peuvent apparaître du fait de la nature du calcul; par exemple, le fait qu'un paiement soit effectué en début ou en fin d'année n'est pas pris en compte, car une année est considérée comme une seule période.

**Remarque:** même si l'outil affiche des messages d'avertissement concernant diverses limites de saisie, il n'est pas exclu que des valeurs de saisie erronées entraînent une représentation incorrecte du résultat final. Il incombe aux utilisateurs de l'outil d'évaluer correctement les conséquences de certaines hypothèses.

La feuille de calcul **E2_Prix_de_la_chaleur** permet de définir différentes structures tarifaires (prix et durées de contrat). Les tarifs correspondent à la structure tarifaire présentée au chapitre 10.5.

Les données des consommateurs de chaleur sont saisies dans la feuille de calcul **E3_Consommateurs**. Le tableau permet de saisir les données de raccordement pour chaque consommateur de chaleur. Les données générales et les besoins en chaleur peuvent être repris du tableau Excel « Relevé de situation » ou saisis manuellement. Il est important de noter que, pour la puissance souscrite, ce n'est pas la puissance calculée qui doit être saisie, mais la puissance convenue contractuellement. À partir des données de consommation et des tarifs, il est possible de calculer les coûts annuels et le prix de revient de la chaleur du point de vue des clients, ou les recettes issues de la vente de chaleur du point de vue de l'entreprise de fourniture de chaleur.

Les données sont rassemblées dans la feuille de calcul **B1_Calculs** et analysées sur une durée de projet de 25 ans. Une fois le projet lancé, ce fichier peut être utilisé pour faciliter le contrôle et le calcul a posteriori, en y intégrant les valeurs réelles des coûts et des recettes totaux.

Les principaux résultats et graphiques sont regroupés dans la fiche de travail **A1_Résultats** et peuvent être imprimés sur deux pages A4.

La fiche de travail **A2_Compte de résultat prévisionnel** rassemble les résultats correspondants et les présente sur toute la durée du projet.

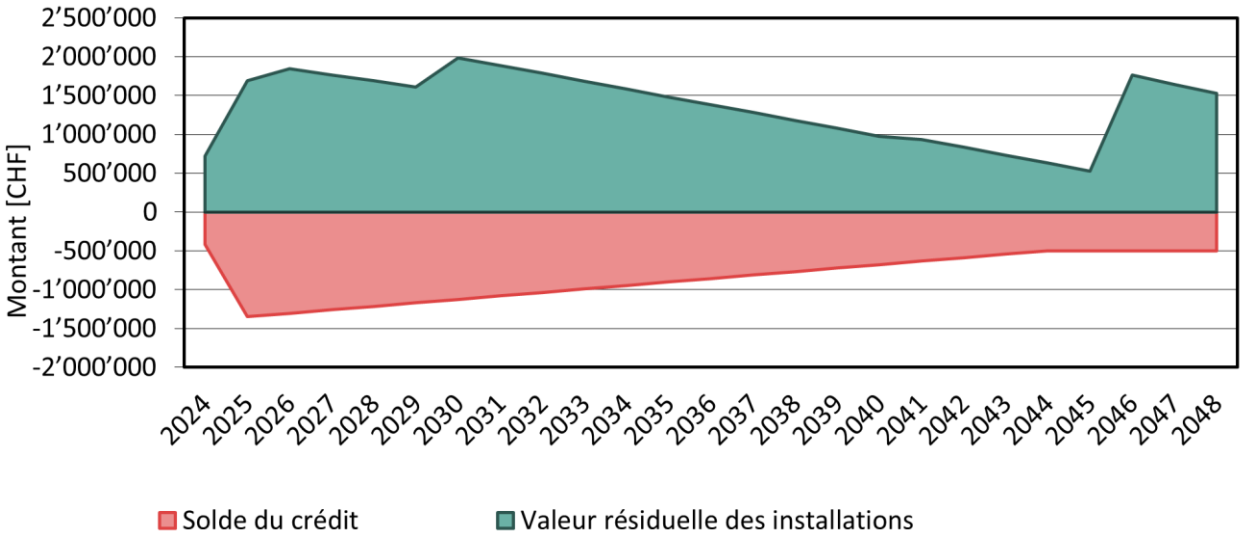



Figure 10.6 Graphique représentant le solde du crédit, la valeur résiduelle de l'installation et le flux de trésorerie cumulé.

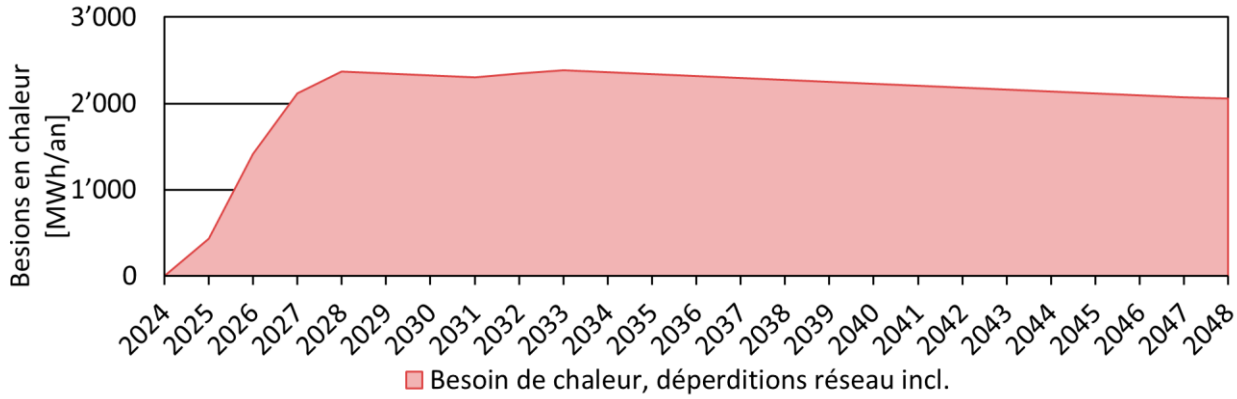



Figure 10.7 Évolution des ventes de chaleur. En raison des rénovations et des mesures d'efficacité énergétique mises en œuvre par les clients, les ventes de chaleur diminuent au fil des ans, à moins que de nouveaux immeubles ne soient raccordés au réseau.

**Autres outils recommandés**

Outre la documentation développée et mise à disposition par QM Chauffages au bois, il existe d'autres outils de calcul qui peuvent être recommandés pour la conception et l'évaluation de la rentabilité.

**Sophena [103]**
Le logiciel open source Sophena permet de réaliser rapidement et de manière rigoureuse la planification technique et économique d'un projet d'approvisionnement en chaleur. Au cœur de Sophena se trouve une simulation de chaudière et de réservoir tampon, à partir de laquelle sont déterminées les courbes de durée annuelle et les indicateurs énergétiques. Sur la base de ces calculs, une analyse de rentabilité selon la norme VDI 2067 est effectuée, y compris la détermination des coûts de production de chaleur. Parmi les autres résultats figurent notamment un bilan des gaz à effet de serre et la densité de charge thermique du réseau.

**THENA** [107]
THENA (Thermal Network Analysis) est un outil de calcul basé sur Excel qui permet une analyse technique simple de la conception du réseau et une estimation approximative complémentaire des coûts du réseau de distribution de chaleur.

**DN-Sensi** [108]
L'outil de calcul Excel DN-Sensi permet de calculer et de représenter graphiquement de manière simple le dimensionnement optimal ainsi que la sensibilité de différents paramètres aux coûts de distribution de chaleur pour des diamètres nominaux allant de DN 20 à DN 250.

## 10.8 Estimation des coûts d'investissement

Les graphiques suivants permettent d'estimer les coûts d'investissement totaux liés à la production de chaleur via une centrale de chauffage (voir figure 10.8) et via un réseau de chaleur comprenant des stations de distribution (voir figure 10.9). Les courbes s'appuient sur les données relatives à des installations réalisées dans le cadre du suivi QM en Suisse et en Autriche entre 2009 et 2018. Les graphiques représentent la majeure partie des installations évaluées qui respectent les principales exigences de qualité. La fourchette de variation est parfois considérable et dépend de différents facteurs.

**Remarques**

Les graphiques suivants ne constituent qu'une première **estimation des coûts d'investissement** (étude préliminaire, étude de faisabilité). Ils fournissent des indications, mais ne doivent pas être utilisés pour déterminer les coûts d'investissement dans le cadre de la phase de planification approfondie d'une centrale de chauffage au bois. Ces graphiques servent de référence pour la comparaison avec les calculs spécifiques au projet.
La **conversion EUR/CHF** n'est pas une simple conversion monétaire, mais tient également compte des **différences de prix** entre l'Autriche et la Suisse, conformément aux résultats des données d'installation analysées, et s'explique par les écarts de prix, de coûts de construction et de niveaux de salaire. D'autres tableaux et graphiques présentant des prix indicatifs pour les conduites de chauffage urbain et les stations de transfert ont été établis par QM Chauffage à distance et publiés dans le manuel de planification du chauffage urbain [19] (conduites de chauffage urbain) ainsi que dans le guide de planification des stations de transfert de chauffage urbain [76] (stations de transfert).

### Valeurs indicatives des coûts d'investissement spécifiques à la production de chaleur

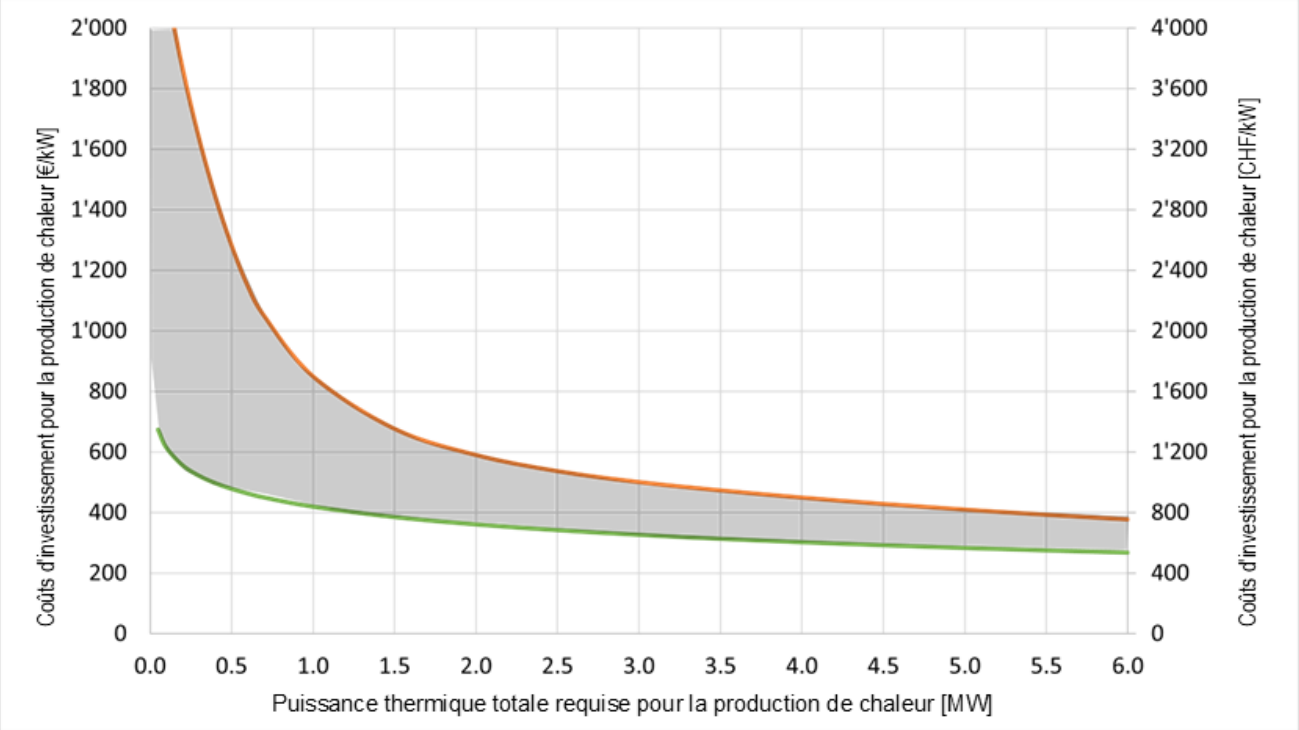



Figure 10.8 Coûts d'investissement spécifiques pour la production de chaleur – Analyse des installations réalisées en Autriche et en Suisse entre 2009 et 2018.

Les coûts comprennent la production de chaleur, les dépoussiéreurs (le cas échéant), les économiseurs et/ou les systèmes de condensation, les accumulateurs de chaleur, les installations de cheminée (conduits), l'intégration hydraulique, les installations électriques, la commande/régulation (MSR), la chaufferie, le stockage de combustible, y compris le déchargement pour les installations mono- et bivalentes avec accumulateur.

La conception répond aux exigences de qualité « E4 Production de chaleur »; la conversion EUR/CHF tient compte des différences de niveau de prix entre l'Autriche et la Suisse.

**Valeurs indicatives des coûts d'investissement spécifiques pour la distribution de chaleur**

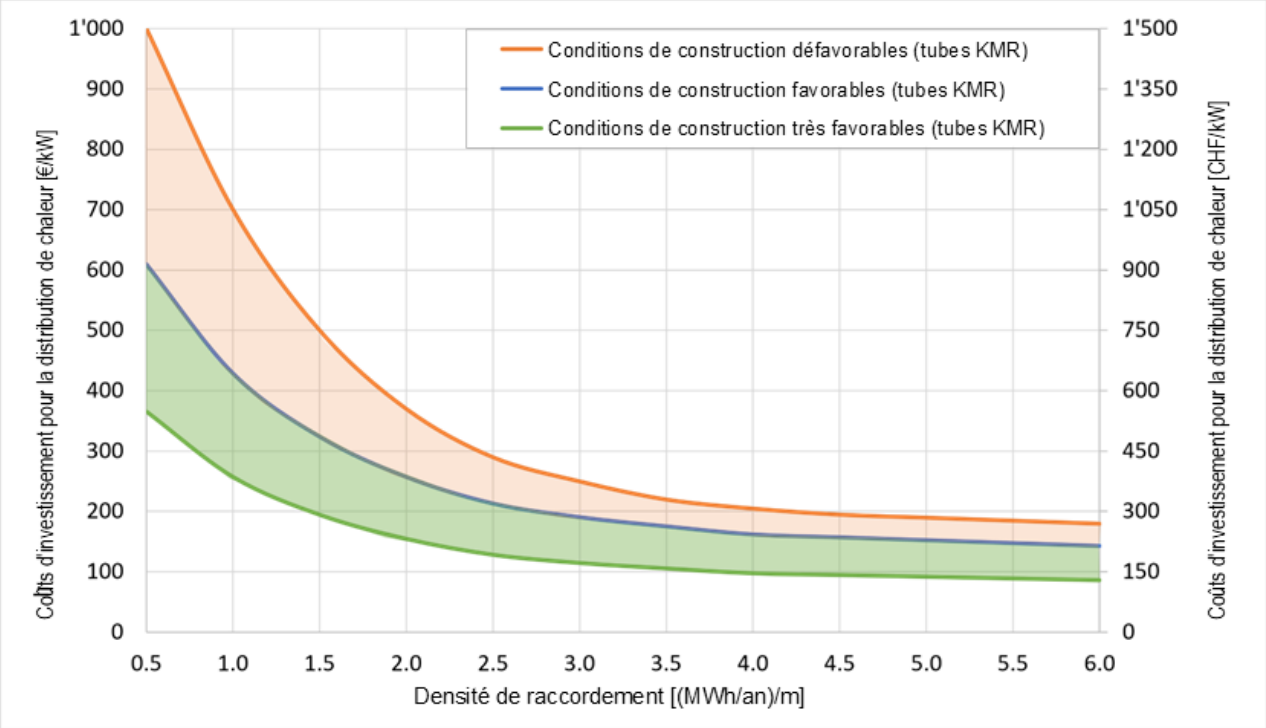



Figure 10.9 Coûts d'investissement spécifiques pour la distribution de chaleur – Analyse des installations réalisées en Autriche et en Suisse entre 2009 et 2018.

Les coûts comprennent le groupe de conduites de transport dans la centrale de chauffage, le réseau de transport, y compris les travaux d'excavation, ainsi que les raccordements domestiques jusqu'aux postes de transfert de chaleur inclus (sans centrale domestique) ;

La conversion EUR/CHF tient compte des différences de niveau de prix entre l'Autriche et la Suisse.

# Partie 3 – Déroulement de la planification

# 11 Relevé de la situation

## 11.1 Introduction

L'analyse de la situation actuelle (relevé de situation) sert de base au choix du système, afin de définir un système de production et de distribution de chaleur adapté au bâtiment ou au site à alimenter.

**Le relevé de la situation constitue la base essentielle de toutes les étapes de planification** ultérieures et joue un rôle déterminant dans la réussite du déroulement du projet et de l'exploitation de l'installation. Une surestimation des besoins en puissance et en chaleur et le surdimensionnement des installations qui en résulte, peuvent entraîner des répercussions techniques et économiques très néfastes sur un projet.

C'est pourquoi il convient d'accorder une grande importance à la réalisation de l'analyse de la situation dès les premières phases de planification. Cette analyse doit être confiée à des planificateurs expérimentés et sa plausibilité doit être vérifiée par un organisme indépendant (p .ex. les responsables qualité de QM Chauffages au bois).

L'analyse de la situation comprend, dans le cadre d'une approche globale, l'évaluation des besoins actuels et futurs en chauffage et en refroidissement, ainsi que l'examen de toutes les sources de chaleur renouvelables et disponibles au niveau régional. Elle permet ainsi de déterminer les besoins annuels en chaleur de l'ensemble de l'installation pour différents scénarios d'approvisionnement et d'extension, ainsi que les courbes de charge et les courbes de durée annuelles correspondantes, qui serviront de base à la sélection du système (voir chapitre 13).

**QM Chauffages au bois** et **QM Chauffage à distance** proposent à cet effet des documents et des outils utiles:

- **Déroulement détaillé du projet** conformément au système de gestion de la qualité (QM) des centrales de chauffage au bois, tel que décrit dans le guide qualité ([15]), dans la partie 3 du présent manuel de planification et dans le manuel de planification du chauffage à distance ([19], page 102 ss.)
- **Questionnaire** pour un raccordement au chauffage urbain, sous forme de modèle Word [109]
- Tableau Excel **Relevé de la situation** [110] destiné au contrôle de plausibilité pour chaque consommateur de chaleur et pour l'ensemble de l'installation. Dans le tableau Excel « Relevé de situation », le choix du système de production de chaleur est évalué directement sur la base des valeurs cibles du système de gestion de la qualité (QM) des centrales de chauffage au bois.

Il est recommandé d'associer dès que possible tous les acteurs concernés par le projet. Il s'agit notamment de la commune d'implantation, du canton ou du Land d'implantation, de la société d'exploitation (p. ex. le contractant), des clients du réseau de chauffage, des entreprises d'approvisionnement en combustibles et en énergie, ainsi que des parties prenantes indirectes telles que les riverains et les propriétaires immobiliers, les associations, les agences régionales de l'énergie, les associations professionnelles du secteur économique et du bois-énergie. Les acteurs concernés par le projet sont décrits en détail dans les rapports « Risques liés aux réseaux de chauffage » [20] et « Aspects socio-économiques des réseaux de chauffage » [18].

**Étapes de travail requises**

**Les étapes de travail** suivantes doivent être disponibles ou définies avec un degré de précision variable, en fonction de l'avancement du projet et des jalons, conformément au système de gestion de la qualité (QM) des centrales de chauffage au bois:

- Au cours de l'étude préliminaire ou de la phase de développement du projet, une première analyse sommaire de la **zone de desserte** est réalisée. Il s'agit alors d'identifier les potentiels existants en matière de sources de chaleur et de puits de chaleur (besoins en chaleur). Pour ce faire, on peut s'appuyer sur des sources d'information telles que les guides et recommandations en matière de planification énergétique, les systèmes d'information géographique (SIG) ou les plans cadastraux (voir également le chapitre 12):
  - Guide de la KEA sur la planification communale du chauffage [111]
  - Modules Cité de l'énergie pour la planification énergétique territoriale [112]
  - Outil PETA 5.1 [113]
  - Outil THERMOS [114]
  - Outil Hotmaps-Toolbox [115]
  - Carte d'information map.geo.admin.ch [116]
  - Outil webGIS pour la Suisse [117].
- Coordination et identification des zones d'approvisionnement potentielles à l'aide des **stratégies énergétiques** ou des **plans directeurs énergétiques** nationaux, régionaux et communaux existants. Le programme « Heat Roadmap Europe » [118] a permis d'élaborer, au niveau européen, des stratégies en faveur d'un chauffage et d'un refroidissement neutres en $CO_2$.
- Évaluation de l'intérêt manifesté par les principaux **clients clés**
- Analyse, évaluation et contrôle de plausibilité des données, p.ex. à l'aide du **tableau Excel « Relevé de situation »** [110] de QM Chauffages au bois.
- Réalisation d'une étude approfondie des besoins en chaleur et des intérêts par le biais d'enquêtes porte-à-porte, de réunions d'information et de questionnaires visant à recueillir des **données détaillées** (chapitre 11.2, besoins des différents consommateurs de chaleur)
- Mise à jour de l'analyse et élaboration de différentes **variantes** pertinentes pour l'approvisionnement en chaleur. Le choix des variantes repose sur les critères suivants:
  - Disponibilité des sources d'énergie locales et renouvelables
  - Part minim. requise d'énergies renouvelables
  - Couverture des pics de consommation
  - Coûts d'investissement et d'exploitation
  - Besoins actuels en énergie de refroidissement
- Répéter le processus en fonction de l'avancement du projet et des étapes clés, et améliorer le niveau de précision (processus itératif).

**Résultats du relevé de situation**

Les besoins annuels en chaleur de l'ensemble de l'installation pour différents scénarios d'approvisionnement et d'extension, ainsi que les courbes de charge et les courbes de durée annuelles correspondantes pour la sélection ultérieure du système (voir chapitre 13).

## 11.2 Analyse des besoins en chaleur

### 11.2.1 Nouvelles constructions

**Les besoins annuels en chaleur pour le chauffage des locaux** doivent être calculés conformément à la norme EN ISO 52016 [119]. Le cas échéant, il convient de se référer à d'autres normes et directives nationales équivalentes. Les apports thermiques dus au rayonnement solaire, aux personnes, aux appareils électriques et à d'autres sources sont pris en compte dans cette norme.

Le calcul des besoins annuels en chaleur pour l'eau chaude sanitaire s'effectue généralement sur la base d'une utilisation standard prédéfinie. À cette fin, outre le tableau 11.2, il est possible de se référer aux normes et directives nationales correspondantes (voir chapitre 19).

**Les besoins normatifs en puissance thermique pour le chauffage des locaux** doivent être calculés conformément à la norme EN 12831 [120]. D'autres normes et directives nationales équivalentes peuvent également être utilisées pour ce calcul. Les apports thermiques dus au rayonnement solaire, aux personnes, aux appareils électriques et à d'autres sources ne sont pas pris en compte dans cette norme. Afin de compenser les effets d'un chauffage intermittent, une puissance de chauffage supplémentaire peut être prise en compte. Sans cette puissance de chauffage supplémentaire, on obtient une valeur moyenne sur 24 heures sans tenir compte des apports thermiques.

La valeur moyenne de la puissance thermique nécessaire pour **l'eau chaude** se calcule en divisant le besoin de chauffage nécessaire pour l'eau chaude par le nombre d'heures de chauffage (fonctionnement hivernal) ou par 8 760 heures (fonctionnement toute l'année). La valeur de pointe des besoins en puissance thermique pour l'eau chaude résulte de la puissance nominale du chauffe-eau. Étant donné que l'on utilise le plus souvent des chauffe-eaux à accumulation avec un circuit prioritaire, il suffit généralement de diviser les besoins annuels en chaleur pour l'eau chaude par 4 000 à 6 000 heures. En cas d'utilisation de chauffe-eau instantanés, de chauffe-eau à débit continu ou de stations d'eau fraîche, le nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge doit éventuellement être réduit. Cela permet de prendre en compte une charge de pointe supérieure à la moyenne théorique, car la charge de pointe peut être plus élevée que la moyenne certains jours et dépend du jour de la semaine et de la saison.

Les **besoins en température** découlent du dimensionnement du système de chauffage et de la production d'eau chaude sanitaire. Le dimensionnement des radiateurs, du chauffage au sol et des échangeurs de chaleur repose généralement sur les indications du fabricant.

### 11.2.2 Bâtiments existants

Le calcul des **besoins annuels en chaleur** s'effectue généralement sur la base de la consommation d'énergie finale antérieure (par exemple, la consommation antérieure de fioul) et du rendement du générateur de chaleur utilisé jusqu'à présent. À partir de ces données, on procède à une répartition entre le chauffage des locaux, l'eau chaude sanitaire et les processus (voir tableau 11.1). Il n'est pas recommandé de choisir la puissance en fonction des chaudières installées jusqu'à présent, de se baser sur les besoins en énergie et en puissance indiqués dans le certificat de performance énergétique ou de se fier à une estimation approximative et non fondée.

Si l'on ne dispose pas de données fiables sur la consommation passée ou s'il n'est pas possible d'établir une répartition fiable entre le chauffage des locaux, l'eau chaude sanitaire et les processus, il convient de procéder à des mesures ou à une estimation qualifiée.

La meilleure méthode pour déterminer les **besoins en puissance thermique consiste** à établir les courbes de charge à l'aide de mesures. Si cette démarche implique généralement un effort trop important pour les petits consommateurs de chaleur, elle est toutefois vivement recommandée, en particulier en cas de prélèvement de chaleur important et pour les installations de chaleur industrielle. Dans ces cas, il est important de planifier suffisamment tôt, car les mesures ne sont possibles que si l'on dispose de suffisamment de temps et d'une installation de production de chaleur en état de marche.

L'expérience montre que les **calculs des besoins en puissance thermique** existants et exploitables sont rares ou reposent sur des méthodes de calcul obsolètes. Les nouveaux calculs échouent souvent faute de plans contenant les informations nécessaires sur la structure détaillée du bâtiment.

Les besoins en puissance thermique sont le plus souvent déterminés à partir des besoins en chaleur antérieurs:

- Besoin maximal en puissance thermique pour le **chauffage des locaux** : division du besoin en chaleur de chauffage par un nombre approprié d'heures de fonctionnement à plein régime (pour les explications et les restrictions, voir l'encadré « Nombre d'heures de fonctionnement à plein régime pour le chauffage des locaux »)
- Besoin thermique moyen pour l'**eau chaude** : division du besoin thermique par le nombre d'heures de chauffage (fonctionnement hivernal) ou par 8 760 heures (fonctionnement toute l'année). Afin de prendre en compte une charge de pointe supérieure à la moyenne théorique, le besoin thermique annuel pour l'eau chaude est généralement divisé par 4'000 à 6'000 heures.
- Besoins en puissance thermique pour la **chaleur de process**: division des besoins en chaleur par un nombre approprié d'heures de fonctionnement à pleine charge, qui doit être déterminé ou estimé au cas par cas en tenant compte des temps de fonctionnement, des pics de chauffage, des pauses, de la réduction nocturne et des week-ends. Il convient de noter que, dans le tableau Excel « Relevé de la situation », la chaleur de process est considérée comme une

moyenne sur les heures de fonctionnement annuelles (moyennes journalières). Les pics de puissance max. ne sont donc pas pris en compte. Dans certains cas, ces données ne suffisent pas à elles seules pour le dimensionnement de l'installation.

Il est possible d'estimer les **besoins en température** en se basant uniquement sur les systèmes de diffusion de chaleur existants, tels que le chauffage au sol, les radiateurs ou les chauffe-eaux. Il est toutefois recommandé de procéder à des mesures de température au niveau de chaque consommateur de chaleur lorsque les températures extérieures sont basses, puis d'extrapoler les paires de valeurs mesurées (température de départ/de retour, température extérieure) pour obtenir des valeurs de dimensionnement.

Les mesures **d'économie d'énergie** prévues doivent être recensées dans le cadre du relevé de situation et prises en compte dans les besoins annuels en chaleur, la puissance thermique requise et les besoins en température.

**Note explicative : Nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge pour le chauffage des locaux**
Le nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge pour le chauffage des locaux [h/a] (également appelé « heures d'utilisation à pleine charge ») correspond au rapport entre les besoins en énergie utile pour le chauffage des locaux, exprimés en kWh/a et les besoins maximaux en puissance thermique pour le chauffage des locaux, exprimés en kW. Le nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge dépend de la courbe annuelle de la température extérieure sur le site de l'installation, de la limite de chauffage et de l'importance de la part du besoin en puissance thermique qui ne dépend pas des conditions météorologiques.

Selon les normes de construction et le type d'utilisation, on obtient des valeurs différentes, qui sont parfois difficiles à estimer, notamment pour les bâtiments non résidentiels en raison d'un fonctionnement limité et du réchauffage, ainsi que de températures ambiantes et de charges internes différentes de celles des bâtiments résidentiels (voir à ce sujet la comparaison entre bâtiments résidentiels et non résidentiels présentée dans le tableau 11.1). Par conséquent, les nombres d'heures de fonctionnement à pleine charge indiqués dans le tableau 11.2 ne s'appliquent qu'aux **bâtiments résidentiels existants** (chauffage des pièces sans eau chaude) construits avant 1990 environ. Ces nombres d'heures de fonctionnement à pleine charge ne doivent pas être appliqués aux nouvelles constructions, aux bâtiments résidentiels existants très bien isolés thermiquement avec des limites de chauffage < 15 °C, ni aux bâtiments non résidentiels ; dans ces cas, les valeurs obtenues sont inférieures.

Le nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge est en principe conçu comme un outil permettant d'estimer les besoins en puissance thermique et de vérifier la plausibilité. Toutefois, selon la situation, les besoins en puissance et l'usage prévu, cette méthode n'est pas suffisante pour prendre une décision d'investissement et nécessite une évaluation plus précise des besoins en puissance sur la base de la norme EN 12831-1 [120] ou, pour les bâtiments existants, à l'aide de mesures (voir chapitres 11.2.1 et 11.2.2 respectivement).

### 11.2.3 Zones constructibles

Dans la mesure où il n'existe pas encore de plans de construction précis pour les zones à bâtir et qu'il n'est donc pas possible d'effectuer des calculs, l'estimation approximative des besoins en chauffage s'effectue sur la base de la surface de référence énergétique et des besoins spécifiques en chauffage. Les besoins spécifiques en chauffage doivent être fixés conformément aux normes de construction actuelles et prévues pour l'avenir, mais ne doivent en aucun cas être surestimés. Les besoins spécifiques en eau chaude sanitaire sont intégrés dans le calcul selon une utilisation standard.

À l'instar des bâtiments existants, il est possible de calculer la **puissance thermique requise** à partir des besoins thermiques (estimés ici). L'estimation des **besoins en température** s'effectue sur la base des systèmes de diffusion de chaleur prévus.

Tableau 11.1 Comparaison entre les bâtiments résidentiels et certains bâtiments non résidentiels.

| | **Maison d'habitation** | **Magasins et restaurants** | **Hôtels sans espace bien-être** | **Piscines couvertes et espaces bien-être dans les hôtels** |
|---|---|---|---|---|
| **Problèmes** | • Calcul des besoins en puissance thermique sans tenir compte des apports thermiques ; ceux-ci sont toutefois relativement bien connus et sont pris en compte dans le tableau Excel<br>• Besoins réguliers en eau chaude relativement bien connus<br>• Pas d'exploitation réduite ou uniquement pendant la nuit | • Calcul des besoins en puissance thermique souvent peu fiable<br>• Charges de chaleur évacuée souvent mal connues<br>• Puissances connectées élevées des réchauffeurs d'air<br>• Temps d'exploitation limités pour les jours et les semaines<br>• Consommation d'eau chaude élevée dans les restaurants et faible dans les commerces (différente selon les branches) | • Calcul des besoins de puissance thermique similaire à celui de la construction résidentielle, mais les gains de chaleur sont moins bien connus<br>• Temps d'exploitation très variables en fonction des saisons.<br>• Pics de consommation d'eau chaude importants, qui ne se produisent pas dans la construction résidentielle classique | • Calcul des besoins de puissance thermique souvent peu fiable<br>• Charge de chaleur évacuée souvent mal connue<br>• Puissances connectées élevées des échangeurs de chaleur pour l'eau des bains<br>• Temps d'exploitation limités pour les jours, les semaines et les années<br>• Consommation d'eau chaude journalière élevée avec des pics de demande élevés |
| **Chauffage locaux** | | | | |
| Besoins thermiques spécifiques | Plateau / Plaine<br>Effectif 100 kWh/(m²*a)<br>Bâtiments exist. 80 kWh/(m²*a)<br>Bâtiments neufs 40 kWh/(m²*a)<br>Région de montagne<br>Effectif 120 kWh/(m²*a)<br>Bâtiments exist. 100 kWh/(m²*a)<br>Bâtiments neufs 50 kWh/(m²*a) | Plateau/plaine<br>Bâtiments exist. 80 kWh/(m²*a)<br>Bâtiments neufs 40 kWh/(m²*a)<br>Région de montagne<br>Bâtiments exist. 100 kWh/(m²*a)<br>Bâtiments neufs 50 kWh/(m²*a) | Plateau/plaine<br>Bâtiments exist. 80 kWh/(m²*a)<br>Bâtiments neufs 40 kWh/(m²*a)<br>Région de montagne<br>Bâtiments exist. 100 kWh/(m²*a)<br>Bâtiments neufs 50 kWh/(m²*a)<br>Valeurs inférieures possibles en cas d'interruptions d'exploitation | Plateau/plaine<br>Bâtiments exist. 300 kWh/(m²*a)<br>Bâtiments neufs 150 kWh/(m²*a)<br>Région de montagne<br>Bâtiments exist. 375 kWh/(m²*a)<br>Bâtiments neufs 190 kWh/(m²*a)<br>(y.c. eau chaude sanitaire et le chauffage de l'eau des bains) |
| Nombre d'heures à pleine charge | Plateau/plaine<br>Effectif 2'000 h/a<br>Bâtiments exist. 2'000 h/a)<br>Bâtiments neufs 1'200 h/a<br>Région de montagne<br>Effectif 2'500 h/a<br>Bâtiments exist. 2'500 h/a<br>Bâtiments neufs 1'500 h/a | Plateau/plaine<br>Bâtiments exist. 1'350 h/a<br>Bâtiments neufs 800 h/a<br>Région de montagne<br>Bâtiments exist. 1'700 h/a<br>Bâtiments neufs 1000 h/a | Plateau/plaine<br>Bâtiments exist. 2'000 h/a<br>Bâtiments neufs 1'200 h/a<br>Région de montagne<br>Bâtiments exist. 2'500 h/a<br>Bâtiments neufs 1'500 h/a<br>Valeurs inférieures possibles en cas d'interruptions d'exploitation | Plateau/plaine<br>Bâtiments exist. 2'000 h/a<br>Bâtiments neufs 1'200 h/a<br>Région de montagne<br>Bâtiments exist. 2'500 h/a<br>Bâtiments neufs 1'500 h/a<br>(y.c. eau chaude sanitaire et le chauffage de l'eau des bains) |
| Puissance spécifique requise | Plateau / Plaine<br>Effectif 50 W/m²<br>Bâtiments exist. 40 W/m²<br>Bâtiments neufs 30 W/m²<br>Région de montagne<br>Effectif 50 W/m²<br>Bâtiments exist. 40 W/m²<br>Bâtiments neufs 30 W/m² | Plateau/plaine<br>Bâtiments exist. 60 W/m²<br>Bâtiments neufs 50 W/m²<br>Région de montagne<br>Bâtiments exist. 60 W/m²<br>Bâtiments neufs 50 W/m² | Plateau/plaine<br>Bâtiments exist. 40 W/m²<br>Bâtiments neufs 30 W/m²<br>Région de montagne<br>Bâtiments exist. 40 W/m²<br>Bâtiments neufs 30 W/m²<br>Les mêmes valeurs s'appliquent en cas d'interruption d'exploitation | Plateau/plaine<br>Bâtiments exist. 150 W/m²<br>Bâtiments neufs 125 W/m²<br>Région de montagne<br>Bâtiments exist. 150 W/m²<br>Bâtiments neufs 125 W/m²<br>(y.c. eau chaude sanitaire et le chauffage de l'eau des bains) |
| **Eau chaude** | | | | |
| Besoins thermiques spécifiques | Maison individuelle (EFH) :<br>15 à 20 kWh/(m²a)<br>Immeuble collectif (MFH) :<br>25 à 30 kWh/(m²a) | Valeurs plus élevées pour les restaurants que pour les habitations : 30 - 70 kWh/(m²a)<br>Valeurs plus basses pour les commerces que pour les habitations : 5 - 15 kWh/(m²*a) | Valeurs nettement plus élevées que dans les immeubles, mais éventuellement compensé par un plus faible taux d'occupation : 30 - 50 kWh/(m²*a) | La production d'eau chaude sanitaire et le chauffage de l'eau des bains sont inclus dans les indicateurs mentionnés ci-dessus.<br>Ces indicateurs ne permettent d'estimer que des besoins totaux approximatifs. |
| Nombre d'heures à pleine charge | Pas 8'760 h/a, car la consommation quotidienne varie ; recommandation :<br>4 000 - 6 000 h/a | Valeurs plus basses que pour les habitations (pointes de puissance plus élevées)<br>2'000 – 3'000 h/an | Valeurs inférieures à celles de la construction de logements (pics de consommation plus élevés) :<br>2'000 – 3'000 h/an | |
| Puissance spécifique requise | Maison individuelle :<br>5 W/m²<br>Immeuble collectif :<br>8 W/m² | Valeurs plus élevées pour les restaurants que pour les habitations : 25 W/m²<br>Valeurs plus basses pour les commerces que pour les habitations : 5 W/m² | La consommation spécifique d'eau chaude est nettement plus élevée que dans les immeubles collectifs :<br>15 à 25 W/m² | |

Tableau 11.2 Nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge pour les bâtiments résidentiels existants (chauffage des locaux sans eau chaude). Ces nombres d'heures de fonctionnement à pleine charge ne doivent pas être appliqués aux constructions neuves, aux bâtiments existants très bien isolés dont la limite de chauffage est inférieure à 15 °C, ni aux bâtiments non résidentiels (voir les remarques d'application dans l'encadré).

| **Lieu** | **N°/h à pleine charge pour les bâtiments résidentiels,** calculé à l'aide du tableau Excel « Relevé de situation » | **N°/h à pleine charge pour les bâtiments résidentiels :** valeurs habituellement utilisées dans les différents pays |
|---|---|---|
| Zurich (CH) | 2'050 h/a * | 2'000 - 2100 h/a * |
| Davos (CH) | 2'800 h/a * | 2'600 - 3'000 h/a * |
| Locarno-Monti (CH) | 1'800 h/a * | 1'700 - 1'900 h/a * |
| Univ. de Graz (AT) | 1'900 h/a ** | 1'800 - 1'875 h/a *** |
| Tamsweg (AT) | 2'350 h/a ** | 1'766 - 1'840 h/a *** |
| Centre-ville de Vienne (AT) | 1'700 h/a ** | 1'714 - 1'813h/a *** |
| Aéroport de Munich (DE) | 2'050 h/a ** | 1'913 h/a **** |
| Karlsruhe (DE) | 1'750 h/a ** | 1'611 h/a **** |

* Une longue expérience acquise en Suisse. Ces chiffres sont en partie fixés par les ordonnances cantonales sur l'énergie. Les chiffres concernant l'Autriche et
** l'Allemagne ont été calculés uniquement à partir de la courbe de durée annuelle, à l'aide du tableau Excel « Évaluation de la situation » basé sur les données suisses. Ces valeurs ne doivent être utilisées en Allemagne et en Autriche qu'à titre comparatif.
*** Source : Manuel à l'intention des conseillers en énergie, JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, édition d'octobre 1994
**** Source : Recknagel/Sprenger/Hönmann, Manuel de chauffage et de climatisation 1990/1991.

# 11.3 Besoins en chaleur de l'ensemble de l'installation

## 11.3.1 Détermination des besoins en puissance thermique

Lors de la détermination des besoins en puissance thermique de l'ensemble de l'installation à partir des données chiffrées fournies par les différents consommateurs de chaleur, les problèmes suivants se posent souvent :

- Les besoins en puissance thermique pour l'ensemble de l'installation résultent d'une combinaison de valeurs calculées, assorties de coefficients de sécurité plus ou moins importants, et de valeurs réelles mesurées, sans **coefficients de sécurité**.
- Les besoins thermiques normatifs pour le chauffage des locaux, calculés selon la norme EN 12831-1 [120], se basent sur une température extérieure normative. En revanche, les courbes de charge déterminées par des mesures se réfèrent à des **températures extérieures réelles.**
- Les besoins thermiques normatifs pour le chauffage des locaux, calculés selon la norme EN 12831-1 [120], ne tiennent pas compte des **gains thermiques internes et externes** dus au rayonnement solaire, à la présence de personnes, aux appareils électriques et autres. En revanche, les courbes de charge déterminées par des mesures tiennent correctement compte de ces gains thermiques.
- Pour estimer les besoins en puissance thermique destinés au chauffage des locaux dans les bâtiments existants à partir des besoins thermiques, il faut disposer d'un nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge, qui dépend de la courbe de température extérieure annuelle sur le site de l'installation, de la température ambiante, de la limite de chauffage et de l'importance de la part non dépendante des conditions météorologiques. **Quels nombres d'heures de fonctionnement à pleine charge** faut-il utiliser ?
- Le calcul des **puissances de chauffage supplémentaires** destinées à compenser les effets d'un chauffage intermittent (par exemple, le chauffage le lundi matin dans un immeuble de bureaux après une activité réduite pendant le week-end) n'est souvent pas pris en compte.
- Les courbes de charge déterminées par des mesures peuvent être établies pour différents cas de charge par régression, à partir de moyennes journalières jusqu'à des moyennes horaires. Il convient de noter que les charges de pointe déterminées par des mesures ne dépendent pas uniquement de la consommation de chaleur, mais aussi du générateur de chaleur (sur- ou sous-dimensionnement éventuel) ainsi que de l'emplacement du point de mesure.
- Les courbes de charge déterminées par des mesures montrent souvent une **part considérable des besoins en puissance thermique qui n'est pas liée aux conditions météorologiques**. Comment prendre en compte cette part des besoins en puissance thermique pour le chauffage des locaux dans les nouvelles constructions ?
- La valeur moyenne des **besoins en puissance thermique pour l'eau chaude sanitaire** (besoins annuels en chaleur pour l'eau chaude sanitaire divisés par 8'760 heures) est tout à fait différente de la valeur de pointe des besoins en puissance thermique pour l'eau chaude sanitaire (puissance connectée du chauffe-eau). La consommation d'eau chaude sanitaire varie souvent d'un jour à l'autre et dépend du jour de la semaine et de la saison.

**Questions auxquelles il faut répondre**
Afin de déterminer de la manière la plus réaliste possible les chiffres relatifs à l'ensemble de l'installation à partir d'une combinaison de calculs et de mesures réelles, il faut répondre aux questions suivantes :

- Comment les gains de chaleur sont-ils pris en compte dans les nouvelles constructions ? Quels sont les nombres d'heures de fonctionnement à pleine charge appropriés pour déterminer les besoins en puissance thermique pour le chauffage des locaux, sur la base des besoins thermiques observés jusqu'à présent dans le bâti existant ?
- Comment prendre en compte la part des besoins en puissance thermique destinée au chauffage des locaux ne dépendant pas des conditions météo ?
- Dans quelle mesure les puissances de chauffage supplémentaires nécessaires pour compenser les effets d'un chauffage intermittent sont-elles prises en compte dans l'installation globale ?
- À quelle température extérieure l'installation globale se réfère-t-elle ?

### 11.3.2 Besoins en puissance thermique représentés sous forme de courbe de charge

La représentation des besoins en puissance thermique sous forme d'une courbe de charge, avec des températures extérieures aussi proches que possible de la réalité, repose sur des bases empiriques et résulte de l'expérience pratique acquise lors de mesures effectuées dans le cadre de rénovations et d'extensions d'installations techniques de grande envergure. Son grand avantage réside dans le fait qu'elle permet de présenter de manière claire la combinaison de données chiffrées issues de calculs basés sur la consommation énergétique antérieure et de mesures réelles. Cette méthode est mise en œuvre et appliquée dans le tableau Excel « Relevé de situation » [110] de QM Chauffages au bois.

Cette méthode repose sur les principes suivants :

- Le chauffage des locaux, l'eau chaude sanitaire et les processus doivent être considérés séparément pour chaque consommateur de chaleur.
- Pour les bâtiments résidentiels courants, on utilise dans le calcul la moyenne journalière des besoins en puissance thermique pour le chauffage des pièces. L'expérience et de nombreuses mesures montrent que la chaleur nécessaire pour chauffer les pièces d'un bâtiment résidentiel à une température extérieure donnée (elle aussi une moyenne journalière) peut être fournie à un moment ou à un autre au cours des 24 heures, en quelque sorte par « lots ». Il suffit que le bilan soit à nouveau équilibré toutes les 24 heures. Les baisses de température nocturnes sont donc à peine perceptibles dans les bâtiments résidentiels classiques. Cela vaut surtout pour les bâtiments résidentiels construits après 1985 ainsi que pour les bâtiments plus anciens ayant fait l'objet d'une bonne rénovation thermique. En cas de températures extérieures très basses, les baisses de température nocturnes peuvent d'ailleurs être désactivées si nécessaire !
- Les cas particuliers, tels que les installations dont le fonctionnement est réduit le week-end et celles présentant un risque de courant d'air froid provenant des systèmes de ventilation, sont dimensionnés – dans la mesure du possible de manière modérée – en fonction des pics de charge.
- Pour les chauffe-eaux à accumulation équipés d'un échangeur de chaleur interne ou externe, la puissance thermique nécessaire à la production d'eau chaude est prise en compte sous forme de moyenne maximale observée, et non sous forme de valeur de pointe. Ces installations fonctionnent pour la plupart avec des circuits donnant la priorité à l'eau chaude (priorité au chauffe-eau).
- Dans le cas des chauffe-eaux à circulation (stations d'eau fraîche) sans ballon de stockage, les besoins en puissance thermique pour la production d'eau chaude sont pris en compte sous forme de valeur de pointe. Dans le cas des installations équipées d'un ballon de stockage, la puissance thermique nécessaire peut également être considérée comme la moyenne maximale observée. Il convient alors de tenir compte du volume du ballon de stockage et de déterminer si les installations fonctionnent ou non avec des circuits prioritaires pour l'eau chaude (priorité au chauffe-eau).
- Pour chaque consommateur de chaleur, des coefficients de sécurité et des majorations pour les pics de charge sont pris en compte et doivent être justifiés de manière plausible. Chaque bâtiment est donc intégré de la manière la plus réaliste possible dans le calcul global, de sorte qu'en règle générale, aucun coefficient de simultanéité n'est nécessaire. Des facteurs de simultanéité modérés ne sont toutefois pas « interdits » (voir chapitre 12.2.5). Les hypothèses retenues concernant les consommateurs de chaleur d'une part, et les marges de sécurité d'autre part, permettront toujours d'obtenir un certain équilibre.
- La représentation se fait sous la forme d'une courbe de charge de l'installation dans son ensemble. En ce qui concerne le chauffage des locaux, on distingue une partie dépendante des conditions météorologiques et une partie indépendante de celles-ci. Cette dernière est indépendante des parties, elles aussi indépendantes des conditions météorologiques, correspondant aux besoins en puissance thermique pour l'eau chaude sanitaire et la chaleur industrielle, ainsi qu'aux pertes de puissance dans le réseau de transport.
- La perte moyenne de la conduite à distance est calculée sur la base des indications du fabricant.

L'un des grands avantages de cette méthode par rapport à la courbe de charge est qu'elle permet de calculer la courbe annuelle des besoins en puissance thermique à partir de la courbe annuelle de la température extérieure.

**Courbe de charge**

La courbe de charge représente les besoins en puissance thermique en fonction de la moyenne journalière de la temp. extérieure. Pour la temp. extérieure, il faut toujours utiliser la moyenne sur 24 heures ; en revanche, les besoins en puissance thermique peuvent correspondre à une moyenne journalière (par exemple pour les bâtiments résidentiels) ou à une valeur de pointe (p.ex. pour les bâtiments bancaires). La courbe de charge de l'ensemble de l'installation résulte de la superposition de plusieurs courbes de charge. Pour le calcul de la courbe de durée annuelle des besoins en puissance thermique, on calcule une courbe de charge pondérée (voir figure 11.1 ou, de manière plus détaillée, le manuel relatif au tableau Excel « Relevé de situation » [110]).

**Courbe annuelle de la température extérieure**

La courbe de durée annuelle de la température extérieure représente la fréquence cumulée de la température extérieure exprimée en nombre de jours par an. La figure 11.2 montre par exemple que la moyenne journalière sur 10 ans de la température extérieure à Zurich était inférieure à 4 °C pendant 100 jours.

**Courbe de durée annuelle des besoins en puissance thermique**

La courbe de durée annuelle des besoins en puissance thermique résulte de la courbe de charge pondérée et de la courbe de durée annuelle de la température extérieure. La figure 11.3 montre p.ex. que les besoins en puissance thermique sont supérieurs à 880 kW pendant 50 jours. Les besoins en chaleur pour ces 50 jours correspondent à l'aire sous la courbe.

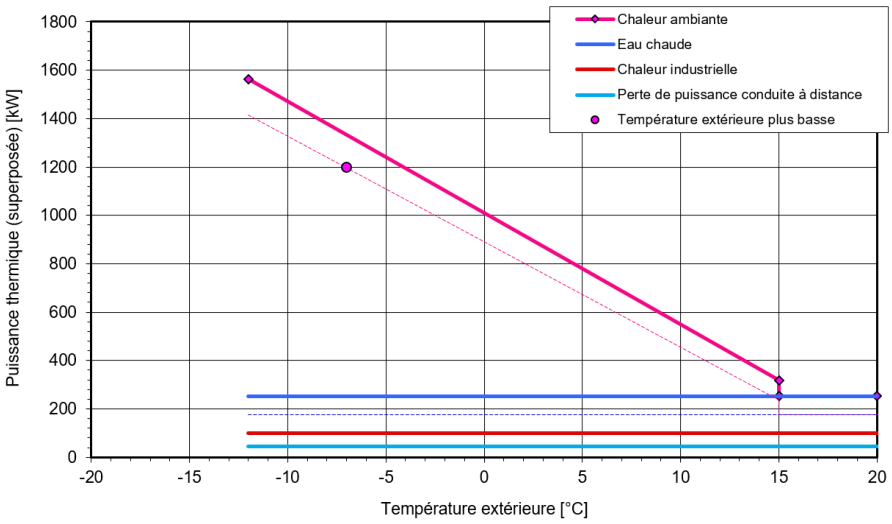



Figure 11.1 La courbe de charge de l'installation complète est représentée en trait plein ; la courbe de charge pondérée, servant à calculer la courbe de charge annuelle de la puissance thermique requise, est représentée en pointillés.

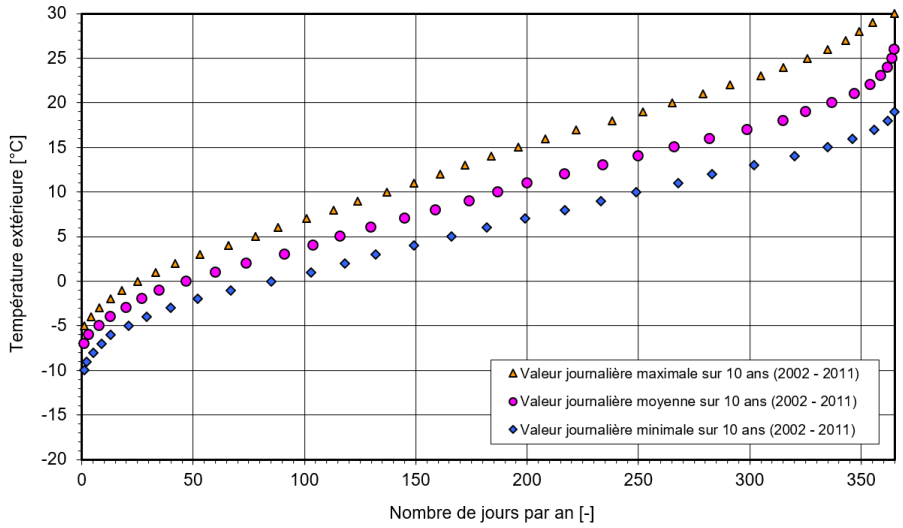



Figure 11.2 Courbes annuelles de la température extérieure pour le site de Zurich-Fluntern (moyenne sur 10 ans, 2002-2011).

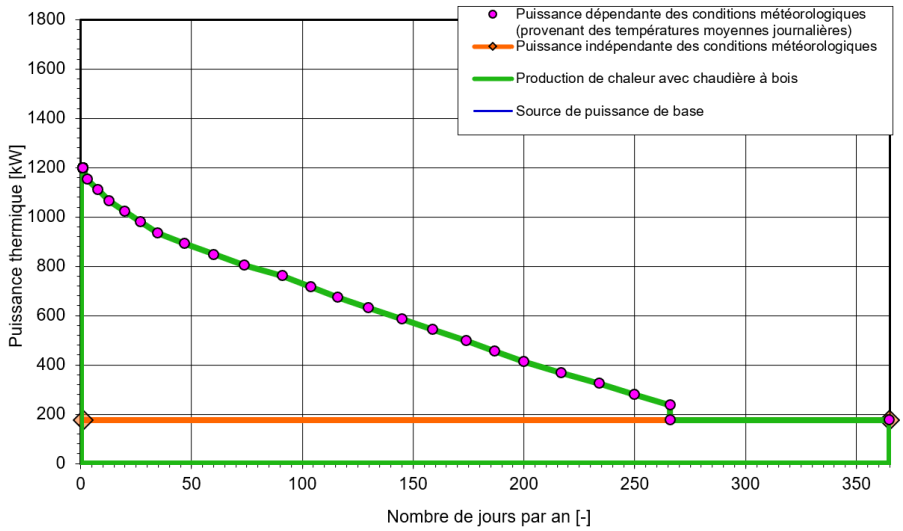



Figure 11.3 Courbe de la puissance thermique annuelle requise; la quantité d'énergie produite à partir du bois est encadrée en vert.

## 11.4 Analyse des sources de chaleur

Outre le bois, d'autres sources de chaleur renouvelables sont de plus en plus utilisées afin de parvenir à l'avenir à un approvisionnement en chaleur entièrement renouvelable et neutre en $CO_2$ (voir chapitre 1.3.2). Les centrales de chauffage au bois reliées à des réseaux de chaleur constituent un point de départ idéal pour exploiter les sources de chaleur disponibles au niveau régional.

Par conséquent, dès les premières phases de planification, il convient d'analyser non seulement les besoins en chaleur et la stratégie d'approvisionnement en bois (voir chapitres 11.2 et 12.2.1), mais aussi la situation des sources de chaleur disponibles (localement). L'accent est mis ici sur la neutralité carbone, la disponibilité et la rentabilité de l'exploitation de la source de chaleur.

Une stratégie énergétique existante (par exemple un plan directeur énergétique), qui définit les sources d'énergie à utiliser pour les bâtiments, les quartiers ou les zones d'approvisionnement plus vastes, s'avère également utile pour cette analyse.

Il convient de privilégier en premier lieu les sources d'énergie locales. Ce n'est que dans un deuxième temps qu'il faut envisager des sources d'énergie non locales, mais provenant si possible de la région. Les sources d'énergie locales se caractérisent par le fait qu'elles ne peuvent pas être facilement transportées, mais qu'elles sont généralement disponibles en abondance, comme l'eau des rivières et des lacs ou la chaleur résiduelle industrielle. Les sources d'énergie non locales, en revanche, peuvent être facilement transportées et stockées, mais ne sont pas disponibles à tout moment et partout (par exemple, le bois et l'énergie solaire).

Dès la première analyse des sources de chaleur disponibles, il convient de prendre en compte les conditions spécifiques au site, le potentiel disponible en termes de puissance et de quantité d'énergie, ainsi que les caractéristiques propres à chaque source de chaleur, telles que la disponibilité dans le temps/le profil de charge, la capacité de réglage ou le niveau de température.

Sur la base de ces données, il est possible d'établir un ordre de priorité et une présélection des sources d'énergie/de chaleur, qui seront prises en compte dans le choix ultérieur du système de production de chaleur (voir chapitre 13).

## 11.5 Intégration dans le déroulement du projet « Gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois »

Comme décrit au chapitre 2, dans le cadre d'un accompagnement qualité selon la norme QM pour les centrales de chauffage au bois, il est prévu, au cours du projet, d'effectuer un contrôle de plausibilité pour chaque consommateur de chaleur et pour l'ensemble de l'installation à l'aide du **tableau Excel « Relevé de situation »** [110]. Ce contrôle nécessite le calcul d'indicateurs et de courbes caractéristiques. Le ou la responsable qualité doit ensuite comparer ces indicateurs et courbes caractéristiques aux données issues de la littérature et à ses propres valeurs empiriques.

Le relevé de situation en général, ainsi que l'utilisation du tableau Excel « Relevé de situation », constituent un processus itératif. Dans le déroulement du projet « QM Chauffages au bois », le relevé de situation est exigé au plus tard lors du jalon 2, au stade de la conception. Celui-ci est mis à jour lors du jalon 3, une fois le dossier d'appel d'offres finalisé, puis renouvelé lors du jalon 5, après l'optimisation de l'exploitation. Au jalon 4, lors de la réception, le relevé de situation doit au moins être vérifié et la documentation de l'installation doit être complétée.

À chaque étape, le niveau d'information s'enrichit certes, mais la marge de manœuvre diminue en conséquence. Alors qu'à l'étape 2, une modification ne représente souvent qu'un simple trait de crayon, aux étapes 4 et 5, l'installation est construite et une erreur d'appréciation peut s'avérer très coûteuse.

Le tableau 11.3 donne un aperçu de l'état d'avancement de l'analyse de la situation à chaque étape et peut servir de liste de contrôle. La colonne « Production de chaleur » ne fait certes l'objet que du choix du système qui suivra (voir chapitre 13), mais elle est déjà abordée ici par souci de clarté.

Tableau 11.3 Aperçu et liste de contrôle de l'état d'avancement de l'analyse de la situation pour chaque étape clé.

| Etape | Utilisateurs/trices de chaleur | Réseau de chauffage | Production chaleur – Généralités | Production chaleur avec bois |
|---|---|---|---|---|
| **2** **Conception préliminaire** | ☐Une liste des consommateurs potentiels de chaleur est disponible, dont au moins 70 % devraient avoir signé une lettre d'intention.<br>☐Pour les nouvelles constructions, les données de planification relatives aux besoins en chaleur, en puissance thermique et en température sont disponibles (avec un degré de précision variable en fonction de l'avancement du projet).<br>☐Pour les bâtiments existants, les chiffres relatifs à la consommation de combustible enregistrés jusqu'à présent sont disponibles. | ☐Un plan de situation indiquant l'emplacement de la centrale de chauffage ainsi que les conduites principales, les dérivations et les raccordements individuels est disponible.<br>☐Le réseau de transport est dimensionné de manière approximative en termes de diamètres nominaux (aucun calcul précis du réseau de canalisations ni de la perte de charge n'a encore été effectué).<br>☐Les pertes de chaleur lors de la distribution ont été estimées de manière approximative en fonction de la densité des raccordements. | ☐Les besoins en chaleur, en puissance thermique et en température sont connus (voir la colonne « Consommateurs de chaleur »).<br>☐Les plans directeurs et stratégies énergétiques nationaux, régionaux ou communaux ont été consultés.<br>☐Les sources de chaleur disponibles ont été analysées en termes de caractéristiques, de disponibilité et de rentabilité.<br>☐Le choix du système (mix énergétique, type et nombre de systèmes de production de chaleur) a été effectué.<br>☐La répartition de la puissance entre les systèmes de production de chaleur a été effectuée.<br>☐Le mode de fonctionnement en été et en hiver a été défini. | ☐Les besoins en chaleur, en puissance thermique et en température sont connus (voir la colonne « Consommateurs de chaleur »).<br>☐La gamme de combustibles et leur disponibilité ont été clarifiées.<br>☐Le choix du système (type de chauffage, monovalent/bivalent, nombre de chaudières) a été effectué.<br>☐La répartition de la puissance entre les chaudières a été effectuée. Le mode de fonctionnement en été et en hiver a été défini. |
| **3** **Projet d'appel d'offres** | ☐La liste des consommateurs de chaleur pour la première phase d'extension et la phase finale est désormais définitive.<br>☐Au début des travaux, au moins 60 % des besoins annuels en chaleur1) doivent être couverts par des contrats de fourniture de chaleur signés.<br>☐Pour les nouvelles constructions les données de planification les plus récentes concernant les besoins en chaleur, en puissance thermique et en température sont disponibles. Pour les bâtiments existants, les chiffres de consommation de combustible antérieurs ont été vérifiés et les besoins en température sont connus de manière fiable (si possible sur la base de mesures). | ☐L'emplacement de la centrale de chauffage ainsi que le tracé des conduites principales, des conduites secondaires et des raccordements individuels ont été définitivement fixés.<br>☐Le réseau de transport a été définitivement dimensionné en termes de diamètres nominaux et de perte de charge.<br>☐Les pertes de chaleur liées à la distribution ont été calculées sur la base de la conception définitive du réseau. | ☐La source de chaleur est définitivement déterminée, et une concession correspondante, un contrat de fourniture de combustible ou un document équivalent est disponible.<br>☐La production de chaleur est définie, ou une description comprenant un schéma de principe, une description fonctionnelle, un concept de mesure, etc. est disponible.<br>☐Le schéma de principe définitif, indiquant les puissances, les températures et les débits, est disponible. | ☐La gamme de combustibles est définitivement fixée et un contrat de fourniture de combustible correspondant a été conclu.<br>☐La solution standard est définie ou une description équivalente comprenant un schéma de principe, une description fonctionnelle, un concept de mesure, etc. est disponible.<br>☐Le schéma de principe définitif, indiquant les puissances, les températures et les débits, est disponible. |
| **4** **Réception** | ☐La liste des consommateurs de chaleur a été mise à jour. | ☐Modifications résultant de la conception d'exécution ont été intégrées dans la documentation relative à l'installation. | ☐Les modifications résultant de la conception d'exécution ont été intégrées dans la documentation relative à l'installation. | ☐Les modifications résultant de la conception d'exécution ont été intégrées dans la documentation relative à l'installation. |
| **5** **Optimisation des opérations** | ☐L'optimisation de l'exploitation est terminée.<br>☐La liste des consommateurs de chaleur effectivement raccordés au cours de la première année d'exploitation a été établie.<br>☐La consommation de chaleur réelle, la puissance de pointe nécessaire et les besoins en température des consommateurs de chaleur figurant sur la liste sont connus.<br>☐Une comparaison a été effectuée entre la réserve d'extension réellement disponible et les consommateurs de chaleur souhaitant encore se raccorder. Si nécessaire, un plan de prospection visant à attirer de nouveaux consommateurs de chaleur a été élaboré. | ☐L'optimisation de l'exploitation est terminée<br>☐Les modifications apportées dans le cadre de l'optimisation de l'exploitation ont été intégrées dans la documentation de l'installation. Les pertes thermiques réelles du réseau de transport pour la première année d'exploitation sont connues. | ☐L'optimisation de l'exploitation est terminée.<br>☐Les modifications apportées dans le cadre de l'optimisation de l'exploitation ont été intégrées dans la documentation de l'installation.<br>☐Le taux d'utilisation réel des installations de production de chaleur est connu (nombre d'heures de fonctionnement à plein régime). | ☐L'optimisation de l'exploitation est terminée.<br>☐Les modifications apportées dans le cadre de l'optimisation de l'exploitation ont été mises à jour dans la documentation de l'installation.<br>☐Le taux d'utilisation réel des chaudières est connu (nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge). |

[1] QM Chauffages au bois base cette valeur sur les ventes annuelles de chaleur de la première phase de construction ou des cinq premières années d'exploitation.

# 12 Conception du système de distribution de chaleur

## 12.1 Introduction

Les chapitres 2 et 11 ont expliqué en détail le déroulement d'un projet dans le cadre d'un accompagnement qualité avec QM Chauffages au bois, ainsi que l'analyse de la situation en général. Le chapitre 12 donne un aperçu des exigences générales relatives à la conception de la distribution de chaleur, ainsi que des principaux indicateurs et termes clés. Pour un traitement approfondi du sujet, nous renvoyons au Guide de planification Chauffage à distance [19].

Comme le montre la figure 8.1, un réseau de chauffage se compose d'une ou plusieurs centrales de chauffage, d'une ou plusieurs conduites principales, d'une ou plusieurs conduites secondaires et des raccordements individuels. Un réseau de chauffage étant un projet d'infrastructure coûteux, doté d'une longue durée de vie et d'exploitation, les modifications a posteriori sont difficiles à mettre en œuvre et entraînent des coûts élevés – il en va de même pour la réparation des défauts, comme en cas de fuite ou de rupture de canalisation. Compte tenu de cette longue durée de vie, il convient de trouver un juste équilibre entre une marge d'extension préventive, qui entraîne des coûts d'investissement plus élevés et des pertes de chaleur, et un dimensionnement juste des conduites. Cette tâche difficile doit être abordée au cas par cas et avec une vision stratégique à long terme. En cas de goulots d'étranglement au niveau de la capacité, il existe des possibilités d'optimisation telles que la gestion de la charge, les accumulateurs de chaleur décentralisés, l'abaissement de la température de retour, l'intégration de générateurs de chaleur décentralisés ou la mise en boucle. En revanche, dans le cas d'un réseau de chaleur surdimensionné, il n'y a pratiquement aucune possibilité d'optimisation, si ce n'est de vendre davantage de chaleur.

La conception de la distribution de chaleur ou du réseau de chaleur est un processus itératif et intersectoriel qui doit être considéré de manière globale, en tant que système comprenant l'analyse de la situation, le choix du système et l'extension progressive du réseau. Les explications et indicateurs suivants portent sur la troisième génération de distribution de chaleur, caractérisée par des températures d'eau chaude < 110 °C, des conduites enterrées et raccordées de manière fixe, dotées d'une gaine en plastique pré-isolée, ainsi que des stations de transfert indirectes compactes (voir [19], page 65 et suivantes). Le chapitre 12.5, qui conclut cet ouvrage, aborde l'évolution de la technologie des réseaux de chaleur, qui se caractérise par des niveaux de température plus bas et dont la complexité augmente en raison de l'intégration de divers systèmes.

## 12.2 Indicateurs et termes clés

### 12.2.1 Zone de distribution potentielle

Les outils et méthodes décrits ci-après pour l'identification des zones de distribution potentielles servent de support à une première évaluation et à une estimation approximative dans le cadre d'une étude de faisabilité (v. également le chap.11). Une planification détaillée est indispensable pour prendre une décision d'investissement.

Outre l'estimation classique des zones de desserte potentielles, on recourt de plus en plus à des sources d'informations numériques telles que les outils SIG, les plans cadastraux ou autres, qui fournissent les besoins en chauffage et en refroidissement ainsi que d'autres informations utiles. Parmi celles-ci figurent par exemple les logiciels en ligne gratuits suivants (voir également la figure 12.1) :

- THERMOS [114] sert à la conception et à l'optimisation des réseaux de chauffage urbain en fonction des exigences spécifiques aux utilisateurs et aux projets, telles que le budget, le climat et les objectifs énergétiques. THERMOS permet de réaliser immédiatement des cartographies et des estimations intégrées des besoins énergétiques.
- Hotmaps-Toolbox [115] et PETA 5.1 [113] aident les autorités, les entreprises de services énergétiques et les planificateurs à élaborer des stratégies de chauffage et de refroidissement aux niveaux local, régional et national. Ces deux outils contiennent des données permettant d'estimer les besoins en chauffage et en refroidissement dans les régions européennes (Hotmaps inclut la Suisse et la Norvège).
- Le site map.geo.admin.ch [116] propose une offre similaire à celle de la boîte à outils Hotmaps pour la Suisse. Il contient des données permettant d'estimer les besoins en chauffage et en refroidissement. Il répertorie en outre plus de 1 000 réseaux thermiques existants.
- Pour estimer la densité de demande thermique dans une zone de desserte de chauffage, il est également possible d'évaluer de manière approximative les besoins annuels en chaleur des différents bâtiments pour le chauffage des locaux, l'eau chaude sanitaire et la chaleur industrielle. Les méthodes suivantes, décrites plus en détail au chapitre 6.4.2 du guide de planification du chauffage urbain [19], permettent d'y parvenir :
- Estimation des besoins annuels en chaleur à partir de la surface de référence énergétique (SRE) et de la qualité du bâtiment.
- Estimation des besoins annuels en chaleur à partir du volume du bâtiment et de la qualité du bâtiment.

En ce qui concerne la chaleur industrielle, les besoins doivent faire l'objet d'une analyse approfondie ; de plus, on dispose rarement de paramètres spécifiques à cet égard.

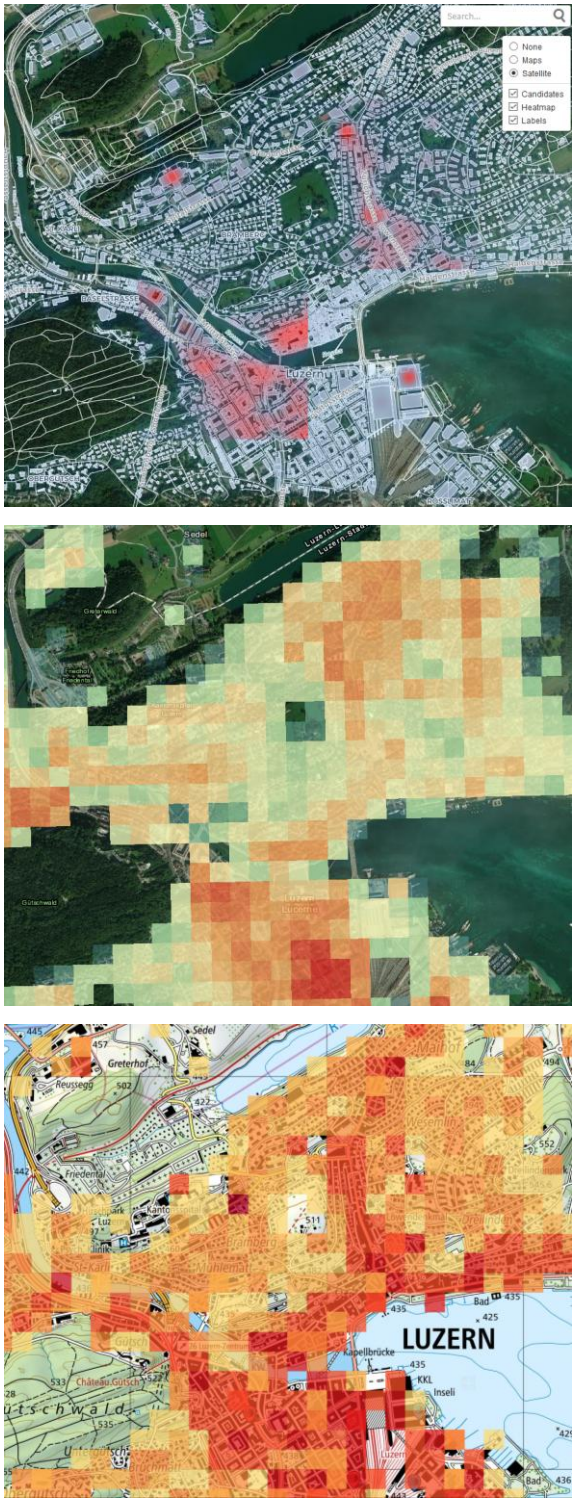



Figure 12.1 Extraits de cartes (captures d'écran) tirés de THERMOS (en haut), de Hotmaps-Toolbox (au milieu) et de map.geo.admin.ch (en bas) pour la ville de Lucerne (CH). Les zones colorées représentent différents niveaux de besoins en chauffage et en climatisation.

## 12.2.2 Densité thermique

La densité de consommation de chaleur (également appelée densité thermique ou densité des besoins en chaleur) est un critère d'éligibilité d'une zone de desserte en vue de son raccordement à un réseau de chauffage urbain. Elle calcule le rapport entre la consommation annuelle de chaleur de l'ensemble des bâtiments d'une zone et la superficie de cette zone. Il est recommandé d'utiliser le tableau 12.1 pour évaluer les densités de consommation de chaleur.

Tableau 12.1 Densité thermique recommandée pour une zone, en tant que critère d'adéquation.

| Compatibilité avec un réseau de chauffage urbain | Densité de consommation thermique en kWh/(a m$^2$) |
|---|---|
| Ne convient pas | < 50 |
| Convient sous conditions | 50 - 70 |
| Convient | > 70 |

**Indicateurs densité de consommation thermique**

- Les zones composées exclusivement de maisons individuelles ne présentent généralement pas d'intérêt (densité de consommation de chaleur comprise entre 15 et 30 kWh/m2).
- Les zones à forte densité de construction, telles que les quartiers d'immeubles collectifs, les centres de villages ou les centres-villes, présentent un intérêt particulier.
- La densité de consommation de chaleur et la rentabilité d'un réseau de chaleur peuvent être améliorées si l'on privilégie le raccordement des gros consommateurs (clients clés) situés dans la zone concernée.
- Un réseau de chaleur destiné à un seul gros consommateur n'est généralement intéressant que si les zones environnantes présentent également une densité de consommation de chaleur élevée.
- Un réseau de chaleur peut également être mis en place pour un petit nombre de gros consommateurs, à condition que la proximité géographique permette d'atteindre une densité de consommation de chaleur suffisante.
- Lorsque les coûts d'investissement et de combustible sont faibles ou que les pertes de chaleur sont minimes (niveau d'isolation élevé, températures de distribution basses), les zones présentant une densité de consommation de chaleur inférieure à 70 kWh/(a m2) peuvent être alimentées de manière rentable en chauffage urbain.

## 12.2.3 Clients clés

Outre la densité de consommation thermique, qui sert à évaluer l'adéquation d'une zone, les sites présentant une forte consommation thermique, également appelés « clients clés », sont essentiels au fonctionnement rentable d'un réseau de chauffage urbain. Une enquête menée en amont auprès des clients clés permet de déterminer leur intérêt pour un raccordement et de fournir des

données de planification. Souvent, pour les bâtiments existants ou les constructions particulières, notamment dans le secteur industriel utilisant de la chaleur de procédé, aucune donnée appropriée n'est disponible ou leur collecte s'avère fastidieuse. Dans l'étude préliminaire, il convient certes de limiter au maximum l'effort nécessaire à cet effet, mais il faut néanmoins s'appuyer sur des demandes de renseignements orales et des estimations qualifiées.

### 12.2.4 Taux de couverture

Dans une zone de desserte potentielle, tous les bâtiments ne sont que rarement raccordés. En particulier lors de la conception de nouvelles zones de desserte de grande envergure, par exemple dans le cadre d'une étude de faisabilité ou d'une étude préliminaire, il convient de prendre en compte les besoins annuels en chaleur d'une zone en fonction de ce que l'on appelle le « taux de desserte », également appelé « taux de raccordement ». Le taux de desserte doit être considéré au cas par cas et peut varier entre 50 % et 80 %.

### 12.2.5 Facteur de simultanéité

Pour le dimensionnement du réseau de distribution de chaleur, il faut également tenir compte d'un facteur de simultanéité. Dans un réseau regroupant de nombreux consommateurs de chaleur, ce facteur décrit le fait que, dans la pratique, tous les consommateurs ne consomment jamais simultanément la puissance maximale ; il se calcule en rapportant la puissance thermique maximale consommée simultanément à la puissance thermique totale souscrite.

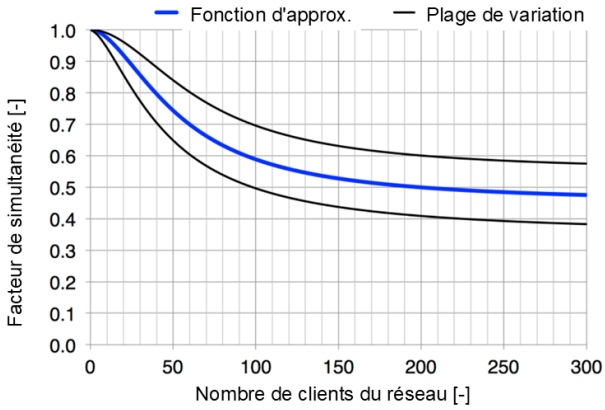



Figure 12.2 Fonction et plage de variation du facteur de simultanéité en fonction du nombre d'abonnés au chauffage (voir [19]).

La figure 12.2 présente le facteur de simultanéité sous forme de **fonction d'approximation** en fonction du nombre d'abonnés au chauffage. Selon ce graphique, pour 10 à 20 abonnés, on peut s'attendre à un facteur de simultanéité d'environ 95 %, avec une fourchette comprise entre 85 % et 100 %. Pour les réseaux comptant plus de 100 consommateurs de chaleur, on peut tabler sur un taux de simultanéité d'environ 60 %.

La **structure de la demande** est déterminante pour définir le facteur de simultanéité. Ainsi, des consommateurs permanents de chaleur industrielle entraînent un facteur de simultanéité plus élevé qu'un lotissement de maisons individuelles, par exemple. Une demande de chaleur temporaire ou saisonnière réduit le facteur de simultanéité, tandis que les pics de charge saisonniers entraînent une augmentation de ce facteur, par exemple pendant la période des vacances dans les stations de sports d'hiver où les hôtels et les locations de vacances affichent un taux d'occupation maximal. L'estimation de la simultanéité repose sur une connaissance approfondie de la structure des consommateurs et sur une grande expérience.

Lors de l'utilisation du **tableau Excel « Relevé de situation »** de QM Chauffages au bois, il convient de noter qu'aucun facteur de simultanéité n'est en principe utilisé, car la conception du générateur de chaleur est basée sur un besoin de puissance moyen journalier, ce qui signifie que l'effet décrit, similaire au facteur de simultanéité, est déjà pris en compte.

### 12.2.6 Densité de raccordement

Dans le cas des réseaux de chauffage urbain, on considère que l'exploitation est rentable lorsque les recettes issues de la vente de chaleur dépassent les coûts de production de la chaleur, qui comprennent les coûts d'investissement et les frais d'exploitation. La densité de raccordement (également appelée « densité linéaire ») constitue un indicateur important pour évaluer la rentabilité. La densité de raccordement est le rapport entre la quantité de chaleur vendue annuellement en MWh/a et la longueur totale, en mètres, des conduites principales, des conduites de dérivation et des raccordements individuels. À l'instar de la densité de consommation de chaleur, la densité de raccordement peut également être calculée pour des sous-réseaux ou des branches de réseau individuels et utilisée à des fins d'évaluation.

Pour une évaluation approximative sans connaissance précise des conditions cadres, les zones d'approvisionnement présentant une densité de raccordement > 2 MWh/(a*m) à l'état définitif et en fonctionnement toute l'année sont généralement considérées comme attractives. Des conditions-cadres telles que les recettes issues de la vente de chaleur, des coûts de combustible avantageux, de faibles pertes thermiques (niveau d'isolation élevé, basses températures du réseau) ou des conditions de construction favorables, ainsi que des aides à l'investissement, permettent une exploitation rentable même avec des densités de raccordement plus faibles.

Le raccordement de petits consommateurs situés à proximité ou le long d'un tracé est en principe souhaitable et ne pose généralement pas de problème en termes de densité de raccordement. Toutefois, si un petit consommateur se trouve loin de la conduite principale ou d'une conduite secondaire la plus proche, il réduit la densité de raccordement, ce qui peut rendre un tel raccordement peu intéressant et nécessite donc d'être examiné au cas par cas. Le raccordement peut, le cas échéant, être subordonné à une participation aux frais de raccordement supplémentaires ou à un prix de la chaleur majoré. Des explications plus détaillées figurent au chapitre 6.4.4 du Guide de planification Chauffage à distance [19].

### 12.2.7 Coûts d'investissement spécifiques

Les coûts spécifiques de la distribution de chaleur varient considérablement et dépendent principalement des conditions de construction, du type de canalisations, du niveau local des prix, de l'état d'avancement du réseau et de la densité de raccordement.

En milieu rural, les coûts de pose des canalisations de chauffage à distance sont généralement inférieurs à ceux observés en milieu urbain. En zone urbaine, les réseaux existants, les bâtiments, la nature du sol, les coûts élevés de remise en état (asphaltage, pavage, etc.) ainsi que des conditions de circulation difficiles empêchent un tracé optimal des canalisations, ce qui entraîne parfois des surcoûts considérables.

Si la valeur cible des coûts d'investissement spécifiques ne peut être atteinte dans le cadre d'un suivi de la qualité selon la norme QM Chauffages au bois, des valeurs plus élevées peuvent être convenues en concertation avec l'investisseur et les bailleurs de fonds. Il convient alors d'examiner l'impact à long terme de ces coûts d'investissement spécifiques plus élevés liés à la distribution de chaleur sur la rentabilité, notamment au regard d'éventuelles hausses de prix, par exemple dues à l'augmentation du coût des combustibles. Dans les deux cas, la rentabilité doit être démontrée à l'aide d'un plan d'affaires, d'un bilan prévisionnel et d'un compte de résultat prévisionnel. Des explications plus détaillées sont fournies au chapitre 10 « Rentabilité ».

### 12.2.8 Pertes de distribution thermique

Tout comme la densité de raccordement, les pertes de distribution de chaleur constituent un paramètre important qui influe sur la rentabilité. Elles dépendent des facteurs suivants :

- Dimensionnement des conduites
- Performance de l'isolation des conduites (coefficient U)
- Niveau de température de l'aller et du retour
- Profil de température en fonctionnement (constant, variable ou constant-variable)
- Densité des raccordements
- Durée de fonctionnement (fonctionnement toute l'année ou saisonnier).

En exploitation, les pertes de distribution de chaleur sont déterminées comme la différence entre la quantité de chaleur injectée dans le réseau de chauffage par la production de chaleur et la quantité de chaleur prélevée par l'ensemble des consommateurs (voir le Guide de planification Chauffage à distance [19], chapitre 7.1.4). Les pertes de distribution de chaleur peuvent être considérées en termes absolus ou relatifs, généralement par rapport à la quantité de chaleur injectée. Dans le cas d'une analyse relative, les pertes de chaleur sont nettement plus élevées en été qu'en hiver, alors que dans le cas d'une analyse absolue, la différence est pratiquement négligeable.

La figure 12.3 présente les pertes de chaleur annuelles relatives (en pourcentage) liées à la distribution en fonction de la densité de raccordement pour différents modes de fonctionnement et différentes températures de départ.

Pour des raisons d'efficacité, selon la norme QM relative aux centrales de chauffage au bois, les pertes de distribution de chaleur ne devraient pas dépasser une valeur cible de 10 % des besoins en chaleur utile des consommateurs. Afin de respecter la valeur cible indiquée dans la figure 12.3, il convient d'atteindre différentes densités de raccordement en fonction du mode de fonctionnement, du niveau de température et des coûts d'investissement.

Dans le cas d'un réseau de chaleur en service, les pertes relatives de distribution de chaleur peuvent être réduites en priorité par une augmentation de la densité de raccordement (densification), ce qui améliore la rentabilité globale.

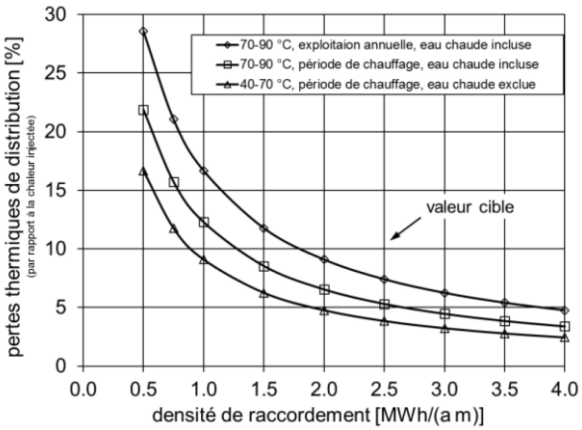



Figure 12.3 Pertes de distribution de chaleur en fonction de la densité de raccordement pour différents modes de fonctionnement et niveaux de température de départ du réseau de chauffage.

### 12.2.9 Dérogation aux critères d'efficacité

Comme déjà décrit au chapitre 12.2.6, des conditions de construction et d'exploitation peu coûteuses permettent une exploitation rentable d'un réseau de chaleur, même avec des densités de raccordement plus faibles.

Lorsqu'on examine la chaleur perdue inévitable (i.e. chaleur fatale; p. ex. issue des processus industriels), des conflits d'objectifs apparaissent également entre l'efficacité (faibles pertes de chaleur lors de la distribution) et la rentabilité (faibles investissements). Étant donné que les sources de chaleur fatale ne se trouvent souvent pas à proximité immédiate des consommateurs de chaleur, il serait judicieux d'autoriser des densités de raccordement plus faibles pour la valorisation de la chaleur fatale, par exemple en acceptant des pertes thermiques plus élevées au niveau des conduites de raccordement ou de transport.

Il n'est pas possible, à ce stade, d'apporter une réponse définitive ni de formuler une recommandation sur cette question. En principe, il devrait toutefois être possible, dans certaines circonstances, d'autoriser des exigences d'efficacité moins strictes, à condition que l'utilisation repose sur une exploitation respectueuse des ressources et, pour l'essentiel, sur des sources d'énergie neutres en $CO_2$. L'évaluation doit donc toujours être effectuée au cas par cas et être adaptée aux conditions-cadres respectives fixées par le législateur, au niveau d'acceptation au sein de la population et à d'autres facteurs encore.

## 12.3 Déroulement du projet

Un réseau de chauffage comprend la production de chaleur, la distribution de chaleur et la fourniture de chaleur aux clients. La description suivante du déroulement du projet couvre les tâches de planification relatives à la distribution de chaleur, depuis la production jusqu'à la fourniture aux clients, et est décrite en détail au chapitre 6 du Guide de planification Chauffage à distance [19]. On distingue généralement une phase de planification et une phase d'exploitation. Le tableau 12.2 répertorie ces phases de planification ainsi que les activités et tâches correspondantes. Le dimensionnement des diamètres de conduites sera abordé dans le chapitre suivant.

Tableau 12.2 Phases de planification et activités selon le manuel de planification du chauffage urbain (voir [19], page 103 ss.).

| Phase de planification | Activité / Mission |
|---|---|
| Étude préliminaire | Déterminer la zone potentielle d'approvisionnement en chaleur<br>Identifier la clientèle cible<br>Mettre à jour la zone d'approvisionnement en chaleur<br>Première analyse de rentabilité<br>Décision si poursuite du développement |
| Conception préliminaire | Identification des clients clés<br>Enquête auprès des petits consommateurs de chaleur<br>Définition de la zone d'approvisionnement en chaleur<br>Deuxième analyse de rentabilité<br>Décision concernant la mise en œuvre |
| Planification des appels d'offre | Conception du réseau de chauffage<br>Cahier des charges des stations de transfert<br>Obtention du permis de construire<br>Appel d'offres et soumission des offres<br>Troisième analyse de rentabilité<br>Attribution, exécution et réception |

## 12.4 Dimensionnement des diamètres des conduites

Le dimensionnement du diamètre des conduites s'effectue en principe sur la base de la perte de charge spécifique par mètre de longueur de conduite, exprimée en Pa/m. La figure 12.4 présente les recommandations relatives aux vitesses d'écoulement maximales selon la fiche technique 67 de l'ÖKL [101] et selon l'Association suédoise du chauffage urbain (DHA) [77]. À titre de comparaison, les vitesses d'écoulement correspondant à une perte de charge spécifique constante de 100, 200 et 300 Pa/m sont indiquées [121].

**Résultats de l'enquête terrain**

Une étude de terrain menée sur 52 réseaux de chauffage urbain a montré qu'environ 80 % des conduites principales et secondaires avaient été surdimensionnées par rapport aux besoins réels [122]. Ce surdimensionnement correspond généralement à un ou deux diamètres nominaux, voire jusqu'à quatre dans certains cas isolés, et entraîne des pertes thermiques et des coûts nettement plus élevés que ceux d'un réseau de chauffage utilisant des conduites au diamètre le plus petit possible.

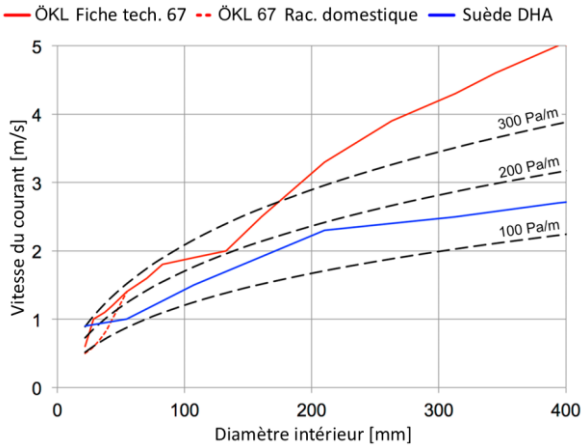



Figure 12.4 Vitesses d'écoulement en fonction du diamètre intérieur des conduites, avec les recommandations relatives à la vitesse d'écoulement maximale selon la fiche technique 67 de l'ÖKL [101] et de l'Association suédoise du chauffage urbain (DHA) [77].
Les vitesses d'écoulement sont également représentées pour des pertes de charge spécifiques constantes de 100, 200 et 300 Pa/m [121].

### 12.4.1 Recommandations pour le dimensionnement

Le dimensionnement des diamètres de conduites repose sur la configuration finale prévue ou attendue. En raison de la longue durée de vie du réseau, une approche stratégique à long terme est indispensable, mais elle s'accompagne également d'incertitudes et de difficultés. Il convient de trouver un juste équilibre entre une marge de capacité préventive, qui entraîne des coûts d'investissement et des pertes thermiques accrus, et un dimensionnement des conduites en principe minimal.

Il convient également de prendre en compte le choix approprié du système de canalisations et des normes d'isolation, le niveau de pression, les conditions et les méthodes de pose, ainsi que la transmission des données et la surveillance des fuites. À cela s'ajoutent les spécifications en matière de statique des canalisations et de température de fonctionnement, telles que la température de fonctionnement en continu en hiver et la température de retour prévue.

Sur la base des contraintes énumérées ci-dessus, le dimensionnement des diamètres de tuyauterie s'effectue selon les **recommandations** suivantes:

- Rugosité hydraulique des conduites k ≤ 0,01 mm
- Conception de tronçons individuels pour une perte de charge spécifique comprise entre 250 Pa/m et 300 Pa/m
- Paramètre de référence pour les tronçons de conduite plus longs présentant des diamètres nominaux différents (par exemple, point défavorable) avec une perte de charge spécifique moyenne comprise entre 150 Pa/m et 200 Pa/m

Pour une première estimation et un premier dimensionnement, le Guide de planification Chauffage à distance

fournit, pour différents systèmes de canalisations (conduites à gaine plastique KMR, KMR-Duo, MMR, conduites à gaine métallique MMR-Duo, conduites à fluide en plastique PMR et PMR-Duo), les puissances de transport en fonction de différents écarts de température et de pertes de charge spécifiques sont représentées graphiquement dans le Guide de planification Chauffage à distance (voir [19], page 191 et suivantes).

### 12.4.2 Procédure de dimensionnement

La procédure de dimensionnement du réseau de chauffage à distance est décrite en détail au chapitre 7.3 du guide de planification du chauffage urbain (voir [19], page 130 et suivantes, et tableaux de dimensionnement page 191 et suivantes).

On part d'un plan ou d'un schéma de réseau dans lequel les conduites sont divisées en tronçons. Un tronçon est défini comme une conduite sans dérivation ni changement de diamètre nominal. Pour le dimensionnement, les informations suivantes doivent être définies et les valeurs connues pour les tronçons :

- Numérotation du tronçon
- Puissance thermique du tronçon
- Débit du tronçon
- Longueur du tronçon
- Résistances individuelles du tronçon (prise en compte des changements de direction et des éléments intégrés)
- Premier dimensionnement de la conduite du tronçon.

**Important** : la détermination du diamètre nominal optimal est un processus itératif.

### 12.4.3 Méthodes de calcul

Le calcul de la perte de charge et le dimensionnement de la canalisation qui en résulte peuvent être effectués de différentes manières.

D'une part, manuellement à l'aide de tableaux, de fiches techni-ques et de formulaires destinés au calcul des réseaux de canalisations, ou à l'aide de logiciels de calcul spécialisés.

Il existe à cet effet une multitude de logiciels de calcul de réseaux de canalisations (p. ex. dans le domaine du génie domestique et des installations techniques). Certains servent uniquement à calculer les pertes de charge, comme p. ex. l'outil Excel « Perte de charge » de la Haute école de Lucerne – Technique & Architecture [123].

Il existe également, spécialement pour le chauffage urbain, des logiciels de calcul plus complets, adaptés au calcul de grands réseaux de chaleur. Ceux-ci disposent souvent d'interfaces complètes pour l'importation et l'exportation de données (p. ex. des données SIG) et couvrent tous les aspects du calcul liés au chauffage urbain, tels que les pertes de charge, les pertes thermiques, le point le plus défavorable, le dimensionnement, l'optimisation, l'analyse du réseau et bien d'autres encore. Il existe une multitude de logiciels de calcul disponibles dans le commerce, tels que:

- STANET du bureau d'études Fischer-Uhrig [124]
- ROKA GS du centre de calcul pour les réseaux d'approvisionnement Wehr GmbH [125]
- SIR-3S de 3S-Consult GmbH [126]
- THENA de Verenum AG [107]

La plupart des logiciels proposent des valeurs par défaut (p. ex. pour la rugosité des conduites), mais celles-ci ne doivent pas être utilisées sans avoir été vérifiées avec soin. Tous les paramètres de calcul pertinents sont généralement librement configurables et doivent dans tous les cas être vérifiés et réglés avec précision

## 12.5 Évolutions dans le domaine des réseaux de chaleur

**Les réseaux de chauffage à distance classiques** acheminent la chaleur depuis la source (générateur de chaleur), avec des températures de départ supérieures à 60 °C et pouvant parfois dépasser 150 °C, vers les consommateurs [77] ; comme le montre la figure 12.5, ils sont également appelés « réseaux à haute température ». Ils servent à alimenter les bâtiments en chauffage et en eau chaude sanitaire, ainsi qu'à alimenter divers procédés.

**Les réseaux à basse température** désignent des réseaux d'échange thermique fonctionnant à des températures inférieures à 60 °C. Ils permettent ainsi un approvisionnement direct en chauffage des locaux jusqu'à une limite inférieure d'environ 30 °C. Des pompes à chaleur décentralisées sont nécessaires pour la production d'eau chaude sanitaire. Lorsque les températures de départ sont inférieures à 30 °C (voir figure 12.5), des pompes à chaleur décentralisées sont nécessaires tant pour le chauffage des locaux que pour la production d'eau chaude sanitaire. Les réseaux à basse température peuvent également servir de source pour des centrales de chauffage à pompes à chaleur décentralisées, qui alimentent en aval des réseaux de distribution conventionnels à haute température.

**Lorsque les températures sont inférieures à 20 °C, le réseau peut également servir de puits de chaleur et donc assurer l'approvisionnement en froid.**

Dans ce dernier cas, on parle également de « refroidissement à distance ». Les applications de distribution de chaleur à moins de 30 °C sont parfois également appelées « chauffage urbain froid » ou « réseau anergétique ». Le terme « réseau anergétique » étant physiquement imprécis, il n'est pas utilisé dans le présent document.

Le terme « **réseaux thermiques** » désigne de manière générale les réseaux destinés au transfert de chaleur à tous les niveaux de température (voir figure 12.5). Comme décrit ci-dessus, ils se distinguent en fonction de la **température de départ**. Il existe par ailleurs différents modes de fonctionnement en fonction du sens d'écoulement de l'eau (dirigé ou non dirigé) et du flux d'énergie dans le système (unidirectionnel ou bidirectionnel; voir à ce sujet [127]).

La tendance dans le développement de la technologie du chauffage urbain, en particulier pour les réseaux à

haute température existants, s'oriente vers des températures de système plus basses afin de permettre une distribution de chaleur efficace et à faibles pertes, d'augmenter le rendement et l'efficacité des sources de chaleur renouvelables et d'exploiter de nouvelles sources de chaleur à basse température. Le choix des températures du système et de la technologie de réseau dépend toutefois très fortement des sources de chaleur disponibles et des conditions générales du projet concerné. Par conséquent, les réseaux à basse température ne sont pas toujours plus adaptés que les réseaux à haute température.

À moyen terme, les sources de chaleur fossiles classiques utilisées pour le chauffage urbain (installations de cogénération fossiles, chaudières à gaz) ne seront plus disponibles. D'autres sources de chaleur à haute température utilisées pour le chauffage urbain, telles que la chaleur résiduelle issue de la cogénération provenant de l'incinération des déchets ménagers ou des ordures, ainsi que les centrales de chauffage au bois et les centrales de cogénération, seront à l'avenir de plus en plus complétées par d'autres **sources d'énergie** renouvelables et d'autres sources de chaleur résiduelle:

- La chaleur ambiante comme source de chaleur pour les pompes à chaleur centralisées et décentralisées destinées au chauffage, ou comme puits de chaleur pour le refroidissement passif des bâtiments (free cooling), en utilisant :
  - Eaux de surface (lacs et rivières)
  - Eaux souterraines (à différentes profondeurs)
  - Géothermie (principalement les sondes géothermiques).
- La chaleur résiduelle provenant de différentes sources d'énergie, notamment des centrales thermiques, des procédés industriels fonctionnant aux énergies fossiles ou à l'électricité, ainsi que la chaleur fatale des installations de réfrigération, des bâtiments et des eaux usées, et, selon les régions, également celle des centrales géothermiques
- Énergies fossiles (pour les pics de consommation et la redondance, leur utilisation sera limitée à l'avenir)

Par ailleurs, l'air ambiant et le rayonnement solaire constituent également des sources de chaleur. Pour les pompes à chaleur, d'autres sources de chaleur que l'air (par exemple l'eau de lac ou la géothermie) s'avèrent plus efficaces pour atteindre les températures et les puissances requises. L'énergie solaire thermique est déjà exploitée à des degrés divers selon les régions et les conditions locales, et son utilisation va continuer à se développer.

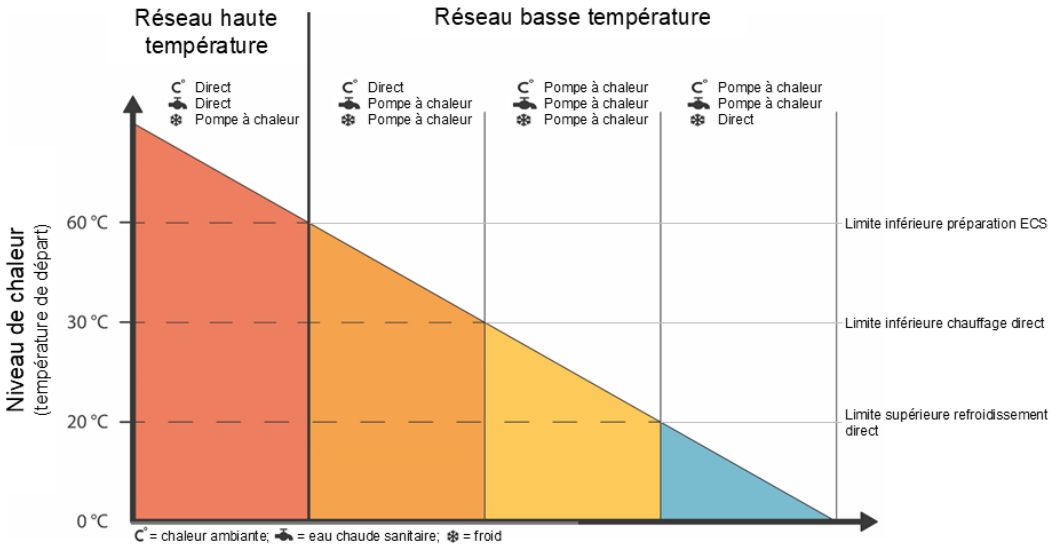



Figure 12.5 Classification des réseaux thermiques en fonction de la température de départ (d'après [127], avec des ajouts).

En tant que matière première renouvelable, le bois-énergie continuera à jouer un rôle important et déterminant dans l'approvisionnement futur en chaleur, grâce à sa disponibilité régionale, à sa capacité de stockage et à sa flexibilité (voir chapitre 1.3.2). Les chaudières à bois bénéficient d'avantages spécifiques liés aux basses températures des réseaux de chaleur, notamment grâce à la réduction des pertes de transport et, en particulier, lorsqu'elles sont associées à un système de condensation des gaz de combustion, ce qui permet d'obtenir des rendements nettement supérieurs à des températures d'alimentation basses (voir chapitre 13).

Les centrales de chauffage au bois peuvent être intégrées de diverses manières dans des systèmes à basse température. Par exemple, la récupération de chaleur à partir du retour pour les sous-réseaux à basse température permet une utilisation en cascade de la chaleur. À l'inverse, une source de chaleur à basse température peut être intégrée dans un réseau de chauffage via une conduite de transport à basse température et une pompe à chaleur centrale.

Il existe de nombreux projets, en cours ou prévus, visant à faire évoluer les concepts et les technologies dans le domaine des réseaux de chaleur. Il s'agit en partie d'installations pilotes et de démonstration, pour

lesquelles la maturité technologique et commerciale n'est pas toujours atteinte, ou encore de concepts très spécifiques développés pour des applications particulières. L'objectif de QM Chauffages au bois et du présent guide de planification est d'assurer une exploitation efficace, économe en ressources et à faibles émissions des centrales de chauffage au bois et des réseaux de chaleur. Dans cette optique, les principes généraux suivants peuvent être formulés pour les réseaux de chaleur et l'interaction entre différentes sources de chaleur renouvelables :

- Utilisation optimale et économe en ressources de toutes les sources de chaleur disponibles au niveau régional
- Privilégier les sources locales par rapport aux sources délocalisées
- La configuration de l'installation et le dimensionnement des différents générateurs de chaleur et accumulateurs de chaleur doivent être réalisés de manière à ce que toutes les sources de chaleur fonctionnent dans des conditions d'exploitation optimales et conformes aux normes (puissance, température).
- Réduire au minimum les pertes de chaleur dans le réseau de chauffage

Dès lors que les centrales de chauffage au bois s'inscrivent dans un système global, les principes et recommandations du présent guide de planification visant à garantir un fonctionnement efficace et à faibles émissions des chaudières à bois doivent être appliqués par analogie ou dans la mesure du possible (voir chapitre 13.7). Par ailleurs, l'état actuel des connaissances ne permet pas de formuler des recommandations générales permettant de déterminer quels concepts sont viables à long terme et lesquels ne le sont pas. Compte tenu de la multitude de concepts existants, il faut partir du principe que tous ne s'imposeront pas à long terme.

Afin d'analyser la situation actuelle, environ 1'000 réseaux ont été recensés dans le cadre du programme « Réseaux thermiques » de SuisseEnergie [116]. Outre deux réseaux de chauffage urbain classiques, l'analyse décrit également sept exemples concrets de réseaux thermiques dont la température de départ est inférieure à 40 °C [128], qui peuvent servir de référence. Le manuel «Low-Temperature District Heating Implementation Guidebook» de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) [129] propose des références complémentaires sur le thème des réseaux à basse température ainsi qu'une multitude d'exemples de projets de démonstration.

# 13 Choix du système de production de chaleur

## 13.1 Introduction

Une fois que les données de base importantes, telles que la production annuelle de chaleur et les besoins totaux en puissance thermique, ont été déterminées à partir de l'analyse de la situation et de la conception de la distribution de chaleur, le chapitre 13 aborde la conception de la production de chaleur. Une variante de base des systèmes de production de chaleur est choisie en fonction des besoins totaux en puissance thermique et de la répartition souhaitée de ces besoins entre les générateurs de chaleur. À cet égard, il convient également d'examiner l'intégration d'autres sources de chaleur renouvelables et de systèmes de production de chaleur renouvelables, la mise en œuvre de mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique, ainsi que les possibilités offertes par la cogénération. Le choix des générateurs de chaleur influe à son tour sur la conception de la centrale de chauffage, du circuit hydraulique et du système de cheminée. En outre, le respect des exigences légales en matière de sécurité, de protection contre le bruit et d'émissions doit être garanti.

## 13.2 Comparaison écologique avec d'autres générateurs de chaleur

### 13.2.1 Aperçu

Lors du choix d'un système de chauffage, outre les coûts, l'impact environnemental et la durabilité occupent aujourd'hui une place prépondérante. Bien qu'il ne soit pas possible d'évaluer l'impact environnemental de manière précise et universelle, il existe différents paramètres et méthodes pouvant être utilisés dans le cadre de la conception d'une installation pour effectuer une comparaison qualitative entre différentes options.

Si l'on souhaite uniquement évaluer l'impact local, par exemple sur le bruit ou la qualité de l'air ambiant, des relevés correspondants peuvent être effectués lors de l'exploitation de l'installation. En ce qui concerne la qualité de l'air, il est judicieux de comparer les émissions de différents systèmes de chauffage. Les facteurs d'émission relatifs aux différents types d'installations sont recensés par les autorités environnementales, régulièrement mis à jour et, en Suisse par exemple, mis à disposition par l'Office fédéral de l'environnement dans la « fiche d'information sur les facteurs d'émission des installations de combustion » [130].

Pour une évaluation plus approfondie, il faut toutefois prendre en compte les impacts des processus en amont et en aval, tels que la construction de la centrale, l'approvisionnement en combustible, la consommation d'énergie auxiliaire et l'élimination des déchets, sur l'ensemble du processus et pendant la durée de vie prévue de la centrale. Une évaluation complète est alors réalisée à l'aide d'une analyse du cycle de vie (également appelée bilan environnemental, écobilan ou Life cycle assessment, LCA).

L'efficacité énergétique et l'impact sur le climat sont des critères particulièrement importants pour l'évaluation des installations énergétiques; ils peuvent être quantifiés comme suit:

- **Évaluation de l'efficacité énergétique (généralement rapportée à l'énergie primaire):** Consommation énergétique cumulée (généralement exprimée sous forme de facteur d'énergie primaire) et, en option, durée de retour énergétique ainsi que le facteur de récolte énergétique qui en découlent
- **valuation de l'impact climatique:** Détermination des émissions totales de gaz à effet de serre (équivalent $CO_2$ ou GES)

Bien que la collecte de ces données nécessite une analyse du cycle de vie, les données obtenues décrivent une seule unité physique qui peut être quantifiée sans pondération subjective des différents effets.

Lorsqu'une évaluation exhaustive des différents impacts environnementaux est requise, certains domaines environnementaux peuvent être évalués séparément (par exemple, les « volumes critiques » sous forme d'indicateurs correspondant au volume d'air critique, au volume d'eau critique, au volume de déchets et à l'équivalent énergétique). En Allemagne, on utilise notamment la méthode d'évaluation des « indicateurs d'impact de l'UBA » mise au point par l'Agence fédérale de l'environnement (UBA). Celle-ci a pour objectif d'établir un classement des différents impacts environnementaux, ce qui nécessite une évaluation subjective de chaque impact.

D'autres méthodes regroupent les impacts environnementaux en un seul indicateur. L'agrégation de différents paramètres en un seul indicateur s'effectue, par exemple, selon la « méthode de la rareté écologique » appliquée en Suisse, qui aboutit à ce que l'on appelle des « points d'impact environnemental » (PIE), ce qui nécessite également une pondération subjective des différents impacts environnementaux. En Suisse, le calcul des UBP est utilisé pour évaluer la durabilité dans le secteur de la construction. Les données correspondantes sont mises à disposition dans une recommandation de la Conférence de coordination des services de la construction et de l'immobilier des maîtres d'ouvrage publics (KBOB). Celle-ci présente des données relatives au facteur d'énergie primaire, aux émissions de gaz à effet de serre et à l'impact environnemental [131].

L'encadré ci-dessous décrit les particularités des méthodes mentionnées.

***Évaluation de l'efficacité énergétique***

***Dépense énergétique cumulée (KEA)***

Le KEA prend en compte la consommation d'énergie liée à la fabrication, à l'utilisation et à l'élimination d'une installation ou d'un produit [132]. En règle générale, c'est l'énergie primaire qui est évaluée, et le KEA est alors également appelé « facteur d'énergie primaire ». Le KEA et la production énergétique annuelle permettent de déterminer la durée de retour énergétique

***Facteur de récolte EF = KEP/KEA***

Si l'on suppose en outre une durée de vie prévue pour le système, il est également possible de déterminer le facteur de rendement énergétique (EF) à partir du KEA et de la production d'énergie cumulée (KEP) sur toute la durée de vie. Selon cette définition, EF < 1, et cette valeur peut p. ex. être utilisée pour comparer deux systèmes d'exploitation du bois-énergie. En revanche, cette définition n'est pas pertinente pour comparer un chauffage au fioul à un chauffage au bois. Dans ce cas, un facteur de rendement peut être déterminé à condition de comptabiliser l'énergie primaire non renouvelable comme coût, tandis que l'énergie primaire renouvelable n'est pas prise en compte.

Avec l'indice NE pour les énergies non renouvelables, on a :

$\mathbf{EF_{NE}}$ = KEP / $KEA_{NE}$

En règle générale, pour les sources d'énergie fossiles, on obtient :

$\mathbf{EF_{NE}}$ = EF < 1

et pour les énergies renouvelables :

$EF_{NE}$ > 1 > EF.

Cette méthode permet de comparer l'efficacité des ressources de différents systèmes énergétiques ; pour les sources d'énergie renouvelables, l'$EF_{NE}$ peut être compris entre > 2 et > 10, tandis que pour les sources d'énergie non renouvelables, l'$EF_{NE}$ est inférieur à 1.

De plus, pour KEA, on a : $\mathbf{KEA_{EE} + KEA_{NE}}$ = KEA

**Évaluation de l'impact sur le climat**

***Equivalent GES***

La vapeur d'eau, le $CO_2$, le méthane ($CH_4$) et de nombreux autres gaz, ainsi que les particules présentes dans l'atmosphère, influencent le bilan radiatif de la Terre, ce que l'on appelle l'effet de serre. L'équivalent $CO_2$, ou équivalent GES, sert à mesurer l'évolution de l'effet de serre. Il décrit la contribution d'un composé à l'effet de serre par rapport au $CO_2$ sur une période donnée. La période de référence est généralement de 100 ans. Sur 100 ans p. ex., 1 kg de méthane ($CH_4$) présente un équivalent $CO_2$ de 28 kg de $CO_2$. Pour le protoxyde d'azote (« gaz hilarant », $N_2O$), cette valeur est de 265. En additionnant toutes les émissions ayant un impact sur l'effet de serre d'un processus sur l'ensemble de son cycle de vie, on peut ainsi déterminer l'équivalent GES. Pour les combustibles fossiles, l'équivalent GES est généralement dominé par le $CO_2$. Dans d'autres processus, le $CH_4$ (p. ex. dans le cas du biogaz) ou le $N_2O$ (p. ex. dans la culture des plantes) peuvent également jouer un rôle important.

***Bilan écologique avec évaluation des différents impacts environnementaux dans différentes catégories d'impact***

On peut citer, à titre d'exemple, la méthode CML, qui comporte 14 catégories, ou la méthode des indicateurs écologiques qui en compte 9 (radioactivité, appauvrissement de la couche d'ozone, métaux lourds, cancérogénicité, smog estival, smog hivernal, pesticides, effet de serre, acidification et surfertilisation). Ces méthodes permettent une comparaison synthétique de nombreux impacts environnementaux. Toutefois, si l'on souhaite p. ex. comparer le bois et le pétrole à l'aide d'un seul indice, il est nécessaire de pondérer l'effet de serre.

***Bilan écologique avec évaluation selon le principe de la rareté écologique***

Dans ce cas, l'évaluation s'effectue par rapport aux objectifs fixés et à leur réalisation actuelle dans une région ou un pays, à l'aide d'un cumul de points d'impact environnemental (PIE). Cette méthode permet d'évaluer facilement la sensibilité de facteurs d'influence importants, tels que les émissions des systèmes de chauffage au bois. L'évaluation globale repose toutefois sur une définition subjective des objectifs, comme p. ex. le dépassement ou le non-respect des valeurs limites nationales.

## 13.2.2 Exemples

Le tableau 13.1 présente une comparaison du facteur de rendement EFNE (sans prise en compte de l'énergie renouvelable utilisée) de différents systèmes de chauffage, dans laquelle l'influence d'un réseau de chauffage urbain a également été étudiée. Les valeurs les plus élevées pour les systèmes de chauffage au bois automatiques, soit 13.0, sont atteintes par les installations non raccordées au réseau de chauffage urbain. Les consommations en amont et les pertes du réseau entraînent des facteurs de rendement légèrement inférieurs de l'ordre de 9, pour des densités de raccordement typiques. Lorsque les densités de raccordement sont faibles, le facteur de rendement diminue.

Tableau 13.1 Facteur de rendement énergétique $EF_{NE}$ de différents systèmes de chauffage, exprimé en TJ de chaleur utile par TJ d'énergie primaire non renouvelable. Pour le chauffage urbain, l'influence de la densité de raccordement, en MWh/(a*m), est également indiquée. Données tirées de [132].

| Chaîne d'approvisionnement | $EF_{NE}$ [TJ/TJ] |
|---|---|
| Pellets de bois | 8.3 |
| Plaquettes avec chauffage urbain à 0,6 MWh/(a*m) | 7.9 |
| Plaquette avec chauffage urbain à 1,5 MWh/(a*m) | 9.0 |
| Plaquettes avec chauffage urbain à 3 MWh/(a*m) | 9.4 |
| Plaquettes sans chauffage urbain | 13.0 |
| Chaudières à bûches | 13.8 |
| Chaudière au fioul avec récupération de chaleur des gaz d'échappement | 0.71 |
| Chauffage au gaz naturel avec récupération de chaleur des gaz d'échappement | 0.74 |

Étant donné que les systèmes de chauffage au fioul et au gaz atteignent un facteur de récolte compris entre 0.71 et 0.74, les systèmes de chauffage au bois ont un effet de substitution 10 à 20 fois supérieur pour les sources d'énergie non renouvelables. Ce potentiel de substitution résulte du rapport entre les facteurs de substitution des systèmes de chauffage au bois et ceux des systèmes de chauffage fossiles (p. ex. 14/0.7 = 20). Cela signifie qu'un litre de pétrole investi dans l'installation et le fonctionnement d'un système de chauffage au bois permet de remplacer 10 à 20 litres de pétrole qui seraient nécessaires pour un système de chauffage au fioul offrant un bénéfice équivalent. Les énergies fossiles générant du $CO_2$, ce facteur constitue également un indicateur de la substitution des émissions de $CO_2$ d'origine fossile.

La figure 13.1 présente un exemple d'analyse du cycle de vie selon la méthode Eco-Indicator. Étant donné que tous les impacts environnementaux sont regroupés en un seul indicateur dans cette figure, l'ordre des variantes étudiées dépend de la pondération attribuée à l'effet de serre. Si l'on attribue une pondération « élevée » à l'effet de serre, les systèmes de chauffage au bois obtiennent de bien meilleurs résultats que les systèmes à combustibles fossiles, tandis que si l'on attribue une pondération « faible » à l'effet de serre, c'est le chauffage au gaz qui obtient les meilleurs résultats, ce qui illustre bien la problématique de la pondération agrégée.

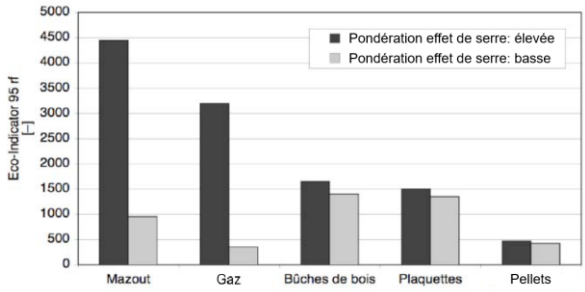



Figure 13.1 Impact environnemental exprimé en points d'indicateurs écologiques par TJ d'énergie utile pour les systèmes de chauffage au fioul, au gaz et au bois, pour les variantes de pondération de l'effet de serre « élevé » et « faible », d'après les données de [133].

Les valeurs relatives au bois en bûches et aux plaquettes de bois sont dues à plus de 80 % aux émissions de particules fines et d'oxyde d'azote. Pour les systèmes de chauffage modernes à plaquettes de bois équipés d'un séparateur de particules fines, cette valeur serait d'environ un tiers.

Le tableau 13.2 présente un extrait de la Conférence de coordination des services de la construction et de l'immobilier des maîtres d'ouvrage publics (recommandation KBOB) [131] concernant l'évaluation du développement durable dans le secteur de la construction en Suisse. Les données relatives au facteur d'énergie primaire et à la consommation d'énergie cumulée sont présentées dans la figure 13.2 (à gauche), seule l'énergie primaire non renouvelable étant prise en compte (indice NE). Les données montrent que les systèmes de bois-énergie atteignent des facteurs de récolte élevés et permettent de réduire la consommation d'énergies non renouvelables d'environ 80 % à 90 % par rapport au fioul et au gaz naturel (figure 13.2, à droite). Un effet similaire est obtenu en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre, comme le montre la figure 13.3 (à gauche).

En revanche, la figure 13.3 (à droite) montre que les écarts entre les différents indicateurs d'impact environnemental sont moins marqués que ceux observés lorsqu'on examine l'énergie primaire ou l'effet de serre. En prenant en compte l'ensemble des impacts environnementaux, l'avantage du gaz naturel par rapport au fioul s'accentue, tandis que les avantages des systèmes de chauffage au bois par rapport aux systèmes de chauffage fossiles s'amenuisent.

Pour les décennies à venir, il convient toutefois d'accorder la plus haute priorité aux émissions de gaz à effet de serre, car le principal défi consiste à atteindre les objectifs climatiques. Comme le montre la figure 13.3 (à gauche), les systèmes de chauffage au bois et les installations solaires présentent des avantages particuliers en matière d'émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, les pompes à chaleur constituent également une solution judicieuse, à condition qu'elles soient alimentées par de l'électricité à faible teneur en $CO_2$. Les données relatives aux pompes à chaleur présentées dans le tableau 13.2 s'appliquent à un approvisionnement en électricité provenant du réseau suisse, avec un bilan de 0,102 kg de $CO_2$ par kWh d'électricité. Pour les autres pays, il convient de tenir compte de l'intensité en $CO_2$ correspondante de l'électricité. Le tableau 13.2 présente les données pour l'Autriche, l'Allemagne et l'Italie. L'électricité dans ces pays présente une intensité en $CO_2$ supérieure d'un facteur d'environ 2, 4 et 6 respectivement. Avec un facteur de 2, l'avantage des pompes à chaleur par rapport aux systèmes de chauffage fossiles s'en trouve réduit; avec un facteur de 4, les émissions de gaz à effet de serre sont similaires; tandis qu'avec une électricité à forte intensité en $CO_2$ (facteur 6), les pompes à chaleur entraînent des émissions de $CO_2$ supérieures à celles des systèmes de chauffage fossiles.

Tableau 13.2 Facteur d'énergie primaire ou dépense énergétique cumulée, facteur de rendement EFNE, émissions de gaz à effet de serre et points d'impact environnemental de différents systèmes de chauffage, rapportés à la chaleur utile produite. Le facteur de rendement $EF_{NE}$ a été calculé comme l'inverse de KEANE. Les données relatives aux pompes à chaleur s'appliquent au mix électrique suisse, dont les caractéristiques sont indiquées à la fin du tableau. Données tirées de [131], à l'exception des données sur l'électricité en Autriche, en Allemagne et en Italie, qui proviennent de [134]

| | Énergie primaire (équivalent pétrole) = Consommation d'énergie cumulée (KEA) | | | Facteur de récolte | Émissions de gaz à effet de serre | Facteurs de pollution |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Non renouvelable ($KEA_{NE}$) | Renouvelable ($KEA_{NE}$) | Totale (KEA) | Non renouvelable ($EF_{NE}$ = 1/$KEA_{NE}$) | GES | UCE |
| Chaudière[1)] | kWh/kWh $Q_n$ | | | kWh $Q_n$/kWh | kg $CO_2$/kWh $Q_n$ | UCE/kWh $Q_n$ |
| Fioul EL | 1.300 | 0.007 | 1.31 | 0.77 | 0.322 | 251.0 |
| Gaz naturel | 1.160 | 0.005 | 1.17 | 0.86 | 0.249 | 151.0 |
| Bûches | 0.194 | 1.580 | 1.77 | 5.2 | 0.045 | 152.0 |
| Bûches avec filtre à particules | 0.198 | 1.580 | 1.78 | 5.1 | 0.046 | 144.0 |
| Plaquettes de bois | 0.097 | 1.420 | 1.52 | 10.3 | 0.020 | 116.0 |
| Plaquettes avec filtre à particules | 0.100 | 1.420 | 1.52 | 10.0 | 0.020 | 106.0 |
| Pellets | 0.210 | 1.320 | 1.53 | 4.8 | 0.038 | 108.0 |
| Pellets avec filtre à particules | 0.213 | 1.320 | 1.53 | 4.7 | 0.038 | 103.0 |
| Gaz naturel | 0.330 | | | 3.0 | 0.142 | 121.0 |
| Pompe à chaleur air/eau (COPA 2.8) | 0.908 | | | 1.1 | 0.063 | 149.0 |
| Pompe à chaleur sol/eau (COPA 3.9) | 0.665 | | | 1.5 | 0.046 | 110.0 |
| Capteur plat WW pour MFH | 0.275 | | | 3.6 | 0.037 | 102.0 |
| Capteur plat RW+WW p. MFH | 0.221 | | | 4.5 | 0.034 | 90.0 |
| Capteur plat WW MFH | 0.086 | | | 11.6 | 0.014 | 40.7 |
| Capteur tubulaire RW+WW pour MFH | 0.193 | | | 5.2 | 0.031 | 76.5 |
| Chauffage urbain[2)] | kWh/$kWh_{final}$ | | | $kWh_{final}$/kWh | kg $CO_2$/$kWh_{final}$ | UCE/$kWh_{final}$ |
| Centrale de chauffage au bois | 0.143 | 1.580 | 1.72 | 6.99 | 0.050 | 120.0 |
| Centrale de cogénération au bois | 0.128 | 1.330 | 1.46 | 7.81 | 0.042 | 102.0 |
| Centrale à eau usée (COPA 3.4) | 0.894 | | | 1.1 | 0.041 | 124.0 |
| Centrale de chauffage eau/eau (COPA 3 | 0.963 | | | 1.0 | 0.062 | 155.0 |
| CAD issu d'une UVTD (Suisse centrale) | 0.452 | | | 2.2 | 0.089 | 75.5 |
| Centrale de cogénération au biogaz | 0.207 | | | 4.8 | 0.079 | 72.9 |
| Électricité provenant du réseau[2)] | kWh/$kWh_{final}$ | | | $kWh_{final}$/kWh | kg $CO_2$/$kWh_{final}$ | UCE/$kWh_{final}$ |
| Suisse (panier de consommation CH) | 2.520 | 0.488 | 3.01 | 0.40 | 0.102 | 347.0 |
| Autriche[3)] | 0.820 | 0.980 | 1.80 | 1.22 | 0.202[4)] | 170.0 |
| Allemagne[3)] | 1.760 | 0.830 | 2.59 | 0.57 | 0.427[5)] | 400.0 |
| Italie[3)] | 2.760 | 0.320 | 3.08 | 0.36 | 0.610 | 489.0 |

Abréviations: COPA: coefficient de performance annuel, Qn: chaleur utile, WW: eau chaude, RW: chauffage locaux, EFH: maison individ., MFH: immeuble collectif

1) Pour les chaudières, l'unité de référence est 1 kWh de chaleur utile

2) Pour le chauffage urbain et l'électricité, l'unité de référence est 1 kWh d'énergie finale (unité commerciale).

3) Source : Treeze 2021 [134] ; toutes les autres données sont tirées de KBOB 2016 [131].

4) Les valeurs concernant les émissions de $CO_2$ en Autriche sont fournies par l'Agence fédérale de l'environnement https://www.umweltbundesamt.at/

5) Les valeurs concernant les émissions de $CO_2$ en Allemagne sont fournies par l'Agence fédérale de l'environnement https://www.umweltbundesamt.de/

Pour le mazout, le gaz naturel et les combustibles à base de bois, les valeurs de KEA indiquées selon la KBOB sont supérieures à 1 et comparables entre elles. Pour le biogaz et les déchets ménagers, les valeurs de KEA sont inférieures à 1, car leur part d'énergie primaire n'est pas prise en compte, ou seulement partiellement. Ces valeurs de KEA = KEAEE + KEANE ne sont pas comparables aux autres et ne figurent pas dans le tableau.

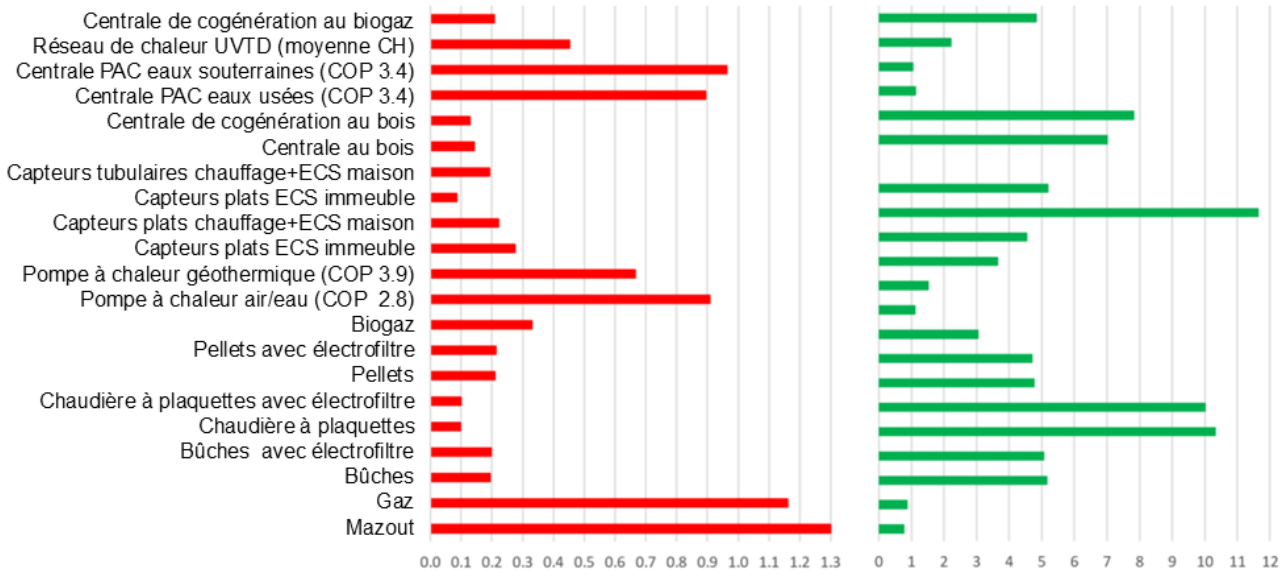



Figure 13.2 À gauche (en rouge): facteur d'énergie primaire par rapport à l'énergie non renouvelable, rapporté à la dépense énergétique cumulée KEANE
À droite (en vert): facteur de récolte par rapport à l'énergie non renouvelable EFNE = 1/KEANE selon le tableau 13.2

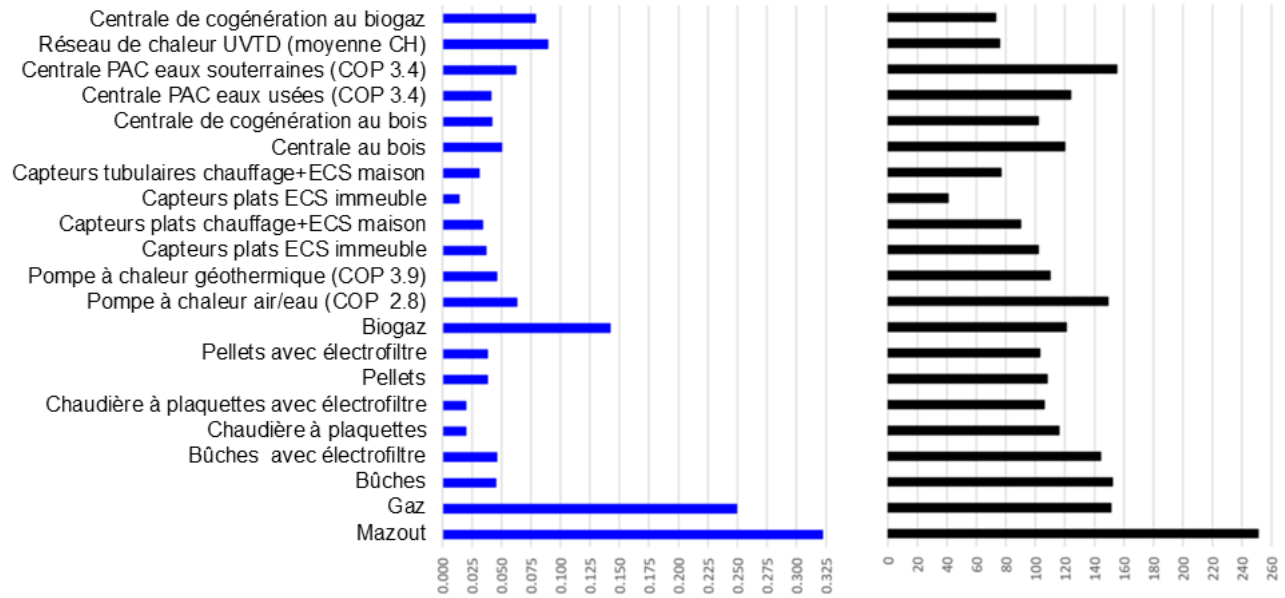



Figure 13.3 À gauche (en bleu): émissions de gaz à effet de serre en [kg $CO_2$-eq/$kWh_{de\ chaleur\ utile}$].
À droite (en noir): Unités de Charge Écologique ou écopoints [UCE/$kWh_{de\ chaleur\ utile}$] selon le tableau 13.2

## 13.3 Exigences générales et définition des principaux termes

Les centrales de chauffage au bois doivent fonctionner de manière peu polluante et rentable. Cela nécessite un système de combustion adapté à la gamme de combustibles, un relevé précis de la puissance thermique de chaque générateur de chaleur, un volume de stockage de combustible (volume net du silo) adapté à la logistique des combustibles et une intégration hydraulique optimale dans l'ensemble du système. En se concentrant sur l'essentiel et en privilégiant des concepts simples, l'objectif est de mettre en place des installations éprouvées et rentables.

En fonction de l'avancement du projet (étapes clés), il convient de définir les **objectifs** suivants avec un degré de précision croissant :

1. Besoins thermiques annuels totaux[1)] ou production thermique annuelle requise par le système de production de chaleur
2. Puissance thermique totale requise[1)]
3. Système de production de chaleur (configuration, concept de régulation)
4. Système de combustion de la chaudière à bois
5. Répartition des besoins totaux en puissance thermique entre les générateurs de chaleur des différentes sources d'énergie (combustibles), y compris leur part respective dans la production de chaleur[1)]
6. Dimensionnement des autres composants de la centrale de chauffage (volume du stockage de combustible et de l'accumulateur de chaleur, etc.)

[1)] conformément au tableau Excel « Relevé de situation »

Lors de la conception d'une centrale de chauffage au bois, il convient de tenir particulièrement compte des caractéristiques spécifiques suivantes de la combustion du bois:

- Temps de réponse long après modification de la puissance de consigne en raison du comportement de combustion lent du combustible, qui dépend de sa teneur en eau et de sa densité (p. ex. les granulés)
- La chaudière à bois peut généralement fonctionner dans une plage de puissance comprise entre 30 % et 100 %, en combustion continue avec une alimentation ininterrompue en air de combustion et une alimentation continue en combustible. Il est possible d'étendre la plage de puissance inférieure jusqu'à environ 15 % en prenant des mesures appropriées (p. ex. le préchauffage de l'air de combustion).
- Charge thermique journalière moyenne minimale requise en fonctionnement à faible charge: comprise entre 10 % et 30 % de la puissance nominale de la chaudière à bois.

La conception optimale d'une centrale de chauffage au bois nécessite des connaissances techniques spécifiques et impose donc des exigences accrues aux concepteurs. Il est recommandé aux personnes ou aux bureaux d'études qui conçoivent et planifient pour la première fois une centrale de chauffage au bois de faire appel à des concepteurs spécialisés expérimentés à titre consultatif. Afin d'atteindre les objectifs de qualité fixés par QM Chauffages au bois, l'installation de production de chaleur doit répondre aux exigences et respecter les valeurs cibles suivantes :

- **Faibles émissions:** les valeurs limites légales ne doivent pas être dépassées pendant la phase de fonctionnement stationnaire d'une installation de chauffage au bois. Cette exigence s'applique à tous les types de combustibles ainsi qu'à toute la plage de puissance de l'installation et nécessite donc des systèmes de régulation adaptés.
- **Émissions olfactives** pendant les phases de fonctionnement transitoires en charge faible, notamment lors de la phase de démarrage, de la phase de combustion complète et du maintien du lit de braises: celles-ci doivent être évitées grâce aux mesures décrites au chapitre 13.5 (voir le tableau 13.4).
- **Rendement annuel élevé ηa > 85 %:** Les conditions nécessaires à l'obtention d'un rendement annuel élevé (voir chapitre 20.12) sont les suivantes:
  - Excès d'air sur toute la plage de puissance (de 30 % à 100 %) avec λ < 1.7
  - Températures moyennes des gaz de combustion < 140 °C et faibles pertes par rayonnement de la chaudière
  - Installation de chauffage au bois monovalente: nombre minimal d'heures de fonctionnement à plein régime après la phase 1 de mise en service: > 1'400 h par an et, une fois la mise en service complète atteinte, > 2000 h par an
  - Installation de chauffage au bois bivalente: selon le tableau 13.5, les heures de fonctionnement à plein régime sont nettement plus élevées (en Autriche, valeur cible selon la directive ÖKL > 4000 h/an)
  - Peu de fonctionnement en veille (mode veille) ou de maintien du lit de braises (rapport entre la durée annuelle de veille et la durée de fonctionnement < 0.2)
  - Nombre de phases de démarrage et de combustion aussi faible que possible
  - Respect des conditions de faible charge conformément au tableau 13.4.
- **Faibles coûts d'investissement** : pas de surdimensionnement de l'installation de production de chaleur, centrale de chauffage simple avec une configuration claire et un nombre réduit au minimum de chaudières offrant une plage de puissance aussi large que possible. Les installations à plusieurs chaudières composées d'appareils standards de série constituent ici une exception.
- **Faibles coûts d'entretien et de maintenance** : utilisation d'un système automatique de décendrage et de nettoyage des tubes de chaudière, garantie d'un fonctionnement sans défaillance grâce à l'utilisation de composants à longue durée de vie, d'un système d'alimentation et de combustion adapté à la gamme de combustibles convenue, ainsi qu'à un entretien régulier. Charge de fonctionnement régulière de la chaudière à bois avec un nombre réduit de phases de démarrage et d'arrêt (la chaudière à bois suit en continu la courbe de charge moyenne sans variations de puissance importantes et de courte durée)

- **Stockage économique du combustible**
  - Le volume du silo de stockage de plaquettes de bois équipé d'un système de déchargement automatique (volume net du silo) doit, dans le cadre d'une chaîne d'approvisionnement directe (v. chap.4.5.5), couvrir les besoins de cinq à sept jours de la chaudière à bois fonctionnant à sa puissance nominale 24 heures sur 24, auxquels s'ajoute le volume de transport du véhicule de livraison. Ce dimensionnement offre au fournisseur de combustible une marge logistique lui permettant de faire face sans difficulté aux jours fériés tels que Noël et le Nouvel An, ou à des interruptions de dernière minute dans la chaîne d'approvisionnement. Dans le cas d'une chaîne d'approvisionnement indirecte (voir chap. 4.5.5), le volume de stockage de combustible requis peut être réduit en accord avec le fournisseur de combustible. La sécurité d'approvisionnement dans des conditions extrêmes telles que les chutes de neige, la pluie verglaçante et autres phénomènes similaires doit être coordonnée avec le fournisseur de combustible.
  - Le volume de stockage des pellets doit correspondre à environ dix jours de consommation à la température de référence, auquel s'ajoute une capacité minimale de livraison de 25 à 30 $m^3$ de pellets par camion. Cela permet de prendre en compte le délai de réaction du fournisseur de combustible, de la commande à la livraison, en prévoyant la marge logistique nécessaire. Vous trouverez de plus amples informations au chapitre 14.2.
- **Utilisation optimale de la chaudière à bois:**
  - La chaudière à bois doit suivre en continu la courbe de charge moyenne, en fonctionnant au niveau de puissance le plus bas possible.
  - Il convient d'éviter les phases fréquentes de démarrage et d'arrêt complet en privilégiant de longues périodes de fonctionnement, c'est-à-dire un taux d'utilisation élevé de la chaudière à bois.
  - La chaudière à bois doit être capable de s'adapter facilement aux variations progressives de la charge du réseau de chauffage (p. ex. en fonction de la température extérieure).
  - Il faut éviter les variations de puissance à court terme, car le lit de combustion a besoin de beaucoup de temps pour s'adapter de manière optimale à la nouvelle puissance de combustion.
  - La consigne de puissance transmise à la chaudière à bois doit être donnée plus lentement que ne le permet le temps de réaction de celle-ci. Pour cela, un accumulateur de chaleur est généralement nécessaire, capable de compenser les pics et les baisses de charge à court terme.
- **Part annuelle de la production de chaleur assurée par la chaudière à bois:**
  - Installation de chauffage au bois monovalente: 100 %
  - Installation de chauffage au bois bivalente avec chaudière à mazout ou au gaz pour les pics de consommation et les périodes de faible charge en été: 80 % à 85 %
  - Installation de chauffage au bois bivalente avec chaudière à mazout ou au gaz pour les pics de consommation: 90 % à 95 %
- **Sécurité d'approvisionnement**: La sécurité d'approvisionnement, c'est-à-dire la redondance en cas de panne d'une chaudière à bois, peut être garantie par les mesures suivantes:
  - Chaudière de pointe au mazout ou au gaz (biofioul/biogaz), puissance de la chaudière ≤ besoins thermiques totaux de la production de chaleur
  - Raccordement pour centrale de chauffage mobile dans le cas d'une installation de chauffage au bois monovalente
  - Délestage des grands consommateurs de chaleur grâce à une installation redondante de chaudières au fioul/gaz
  - Raccords pour installations de chauffage mobiles au niveau de la centrale de chauffage ou chez certains grands consommateurs de chaleur (p.ex. des entreprises industrielles ayant des processus de production critiques).

**Termes:**

**Entretien du lit de braises** Afin qu'un foyer à bois puisse redémarrer après quelques heures d'inactivité sans qu'il soit nécessaire de le rallumer manuellement, le lit de braises est entretenu pendant cette période d'attente en y ajoutant périodiquement de petites quantités de combustible.

**Fonctionnement de maintien du lit de braises à faibles émissions et contrôlé**
Périodiquement, une petite quantité de combustible est ajoutée sur la grille et brûlée de manière contrôlée jusqu'à l'obtention d'un lit de braises, les ventilateurs d'air de combustion étant en marche. Une fois les ventilateurs d'air de combustion arrêtés, le lit de braises renouvelé ne doit plus contenir de fragments de combustible susceptibles de dégager des gaz de carbonisation lors du processus de pyrolyse.

**Allumage automatique**
Lorsque le combustible est sec (teneur en eau M < 35 % à 40 % maximum), la combustion est arrêtée avec un faible niveau d'émissions en laissant le lit de combustible se consumer jusqu'à devenir un lit de braises pendant la phase de combustion finale, les ventilateurs d'air de combustion restant en marche. Celui-ci ne doit plus contenir, lors de l'arrêt des ventilateurs d'air de combustion, de particules de combustible susceptibles de dégager des gaz de combustion résiduelle. Après la phase d'arrêt, lorsque la puissance est à nouveau requise, le processus de combustion est relancé par un allumage automatique (ventilateur d'allumage ou tiges d'allumage).

**Durée de fonctionnement**
La durée de fonctionnement comprend la période de fonctionnement normal et la période de veille (maintien du lit de braises ou phase de fonctionnement sans demande de puissance) d'une installation de combustion entre le début et la fin de la saison de chauffage.

## 13.4 Qualité du combustible et système de combustion

Le choix du système comprend celui du système de combustion de la chaudière à bois, qui est déterminé par la qualité du combustible.

La classification des combustibles et des tailles de particules de QM Chauffages au bois repose sur les spécifications de la norme EN ISO 17225-1. La classification des tailles de particules a été complétée par les classes S de la norme EN ISO 17225-4.

QM Chauffages au bois a complété la classification des combustibles avec des plaquettes de bois de qualité fine/grossière et a encore réduit la section transversale des particules surdimensionnées par rapport à la norme. La classification des combustibles est décrite en détail dans le chapitre 4 bois-énergie. À l'aide du tableau 13.3, il est possible d'attribuer à une qualité de combustible donnée le système de combustion recommandé dans la plage de puissance correspondante.

Tableau 13.3 Domaine d'utilisation recommandé des combustibles bois (selon la classification des combustibles pour les systèmes de combustion et les plages de puissance (voir également FAQ 36).

| Classification des combustibles | Système de combustion | Plage de puissance | Remarques |
|---|---|---|---|
| PFS et IS-P16S-M20 | Petits foyers, appareils standards de série<br>Chauffage à foyer volcan, grille fixe* | 20 kW - 200 kW | Plaquettes de bois de qualité finement tamisés avec F05 |
| PFS et IS-P31S-M20 | Appareils standards de série<br>Chauffage à foyer volcan, grille fixe* | > 100 kW | Plaquettes de bois de qualité tamisés grossièrement avec F05 |
| PFS et IS-P31S-M35 | Chauffages à foyer volcan et grille mobile | > 200 kW | |
| PFS et IS-P31S-M50 | Chauffages à foyer volcan et grille mobile | > 200 kW | |
| PFS et IS-P31S-M55+ | Chauffage à grille mobile | > 200 kW | |
| P31-M35 | Chauffage à grille mobile | > 200 kW | PSTCR, BEP, SPF |
| P31-M50 | Chauffage à grille mobile | > 200 kW | PSTCR, BEP, SPF |
| P31-M55+ | Chauffage à grille mobile | > 200 kW | PSTCR, BEP, SPF |
| PFS et IS-P45S-M35 | Chauffage à grille mobile | > 500 kW | |
| PFS et IS-P45S-M50 | Chauffage à grille mobile | > 500 kW | |
| PFS et IS-P45S-M55+ | Chauffage à grille mobile | > 500 kW | |
| P45-M35 | Chauffage à grille mobile | > 1'000 kW | PSTCR, BEP, SPF, BR |
| P45-M50 | Chauffage à grille mobile | > 1'000 kW | PSTCR, BEP, SPF, ED |
| P45-M55+ | Chauffage à grille mobile | > 1'000 kW | PSTCR, BEP, SPF, ED |
| P63-M35 | Chauffage à grille mobile | > 3'000 kW | PSTCR, BEP, SPF, BR |
| P63-M50 | Chauffage à grille mobile | > 3'000 kW | PFS, RI, PSTCR, PWK, BEP, SPF, ED |
| P63-M55+ | Chauffage à grille mobile | > 3'000 kW | PFS, RI, PSTCR, PWK, BEP, SPF, ED |

Il est supposé que les exigences relatives à la capacité de stockage (guide Q; tableau 19) et à la charge thermique journalière moyenne minimale en mode de fonctionnement à faible charge (guide Q; tableau 20) sont respectées.

*Chauffage à grille fixe : chauffage à grille sans mouvement actif du combustible sur la grille (p. ex. grille plane, grille inclinée). Le combustible est transporté sur la grille à l'aide d'une vis sans fin, les cendres peuvent être éliminées, par exemple en basculant les segments de la grille.

Spécifications pour les sous-produits de la transformation du bois (SPT-M10-20), les plaquettes de bois et les sciures à forte teneur en poussière :

- Pour les foyers volcan et à grille, une teneur en poussière maximale de 50 % est autorisée, au-delà, prévoir un foyer à injection de poussière.
- Afin d'éviter la formation de scories dans le lit de combustion, l'utilisation d'une recirculation primaire des gaz de combustion doit être envisagée (voir chapitre 5.3.2).
- La granulométrie (proportion de plaquettes, de sciure et de poussière) et la composition chimique sur la base d'analyses du combustible constituent la base des prestations de garantie du fabricant du système de combustion.

## 13.5 Sélection et conception du système de production de chaleur

Pour la sélection et la conception du système de production de chaleur, les données de référence suivantes doivent être connues:

- Besoins annuels totaux en chaleur[1)]
- Besoins en puissance thermique[1)] et courbe de charge[1)] de l'installation totale
- Courbe annuelle de la puissance thermique requise avec les parts de puissance de la chaudière à bois et de la bande[1)]
- Évolution future des ventes de chaleur (rénovations thermiques, climat, potentiel d'extension, « clients à risque »)
- Charge de chauffage journalière moyenne minimale en mode faible charge dans les phases d'extension selon le Tableau 13.4

- Température de départ $T_{VL}$ en fonction de la température extérieure
- Température de retour principale $T_{RL}$
- Offre et qualité des combustibles en fonction de la logistique des combustibles: chaîne d'approvisionnement directe ou indirecte
- Potentiels de chaleur résiduelle et de sources de chaleur

[1] selon le tableau EXCEL « Relevé de situations »

Le chapitre 13.3 présente les exigences déterminantes pour le choix d'une installation de chaudières à bois monovalente ou bivalente. Les exigences relatives au mode de fonctionnement et à l'utilisation des chaudières à bois déterminent la conception de la puissance nominale et le nombre de chaudières.

**Procédure**

- Sélection du système de production de chaleur comme variante de base:
  - Selon la classe de puissance conformément au Tableau 13.5
  - Répartition de la puissance thermique des différents générateurs de chaleur dans les installations bivalentes et détermination des besoins en combustible
- Sélection du système de combustion en fonction de la qualité du combustible et de la logistique de combustible (chaîne d'approvisionnement directe ou indirecte)
- Conception des composants de l'installation :
  - Installation de combustion avec composants supplémentaires (stockage du combustible, système de transport du combustible, épuration des gaz de combustion, etc.)
  - Intégration hydraulique, y compris le volume de l'accumulateur de chaleur
  - Centrale de chauffage
  - Cheminée (système d'évacuation des gaz de combustion)
- Vérification du respect des exigences en matière de sécurité, de protection contre le bruit et d'émissions
- Vérification de la variante de base définie en tenant compte des variantes supplémentaires (chap. 13.6) et des options supplémentaires (chap. 13.7)
- Détermination des coûts d'investissement et des coûts annuels, évaluation de la rentabilité (chap.10).

### 13.5.1 Variantes de base des systèmes de production de chaleur avec installation de chauffage au bois

Les installations de production de chaleur à combustion bois peuvent être conçues comme des installations à une ou plusieurs chaudières, monovalentes ou bivalentes avec accumulateur. Une fois que le besoin total en puissance thermique a été déterminé en tenant compte de la courbe de charge et de la courbe annuelle du besoin en puissance thermique de l'ensemble de l'installation et des phases d'extension, et que toutes les exigences imposées à l'installation de chauffage au bois ont été précisément définies, l'une des variantes de base des systèmes de production de chaleur répertoriées dans le Tableau  est sélectionnée.

Toutes les variantes de base répertoriées disposent d'un accumulateur de chaleur afin de répondre aux exigences générales du chapitre 13.3.

Les variantes de base sans accumulateur ne peuvent être choisies que si l'installation de chauffage au bois fonctionne en charge continue.

Pour choisir le système de production de chaleur, il faut tenir compte, outre de la classe de puissance, **des exigences de qualité et des facteurs d'influence** suivants:

- **Nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge** des chaudières à bois selon Tableau 13.5; pour atteindre un nombre élevé d'heures de fonctionnement à pleine charge par an sans usure accrue, il faut une charge uniforme (faible nombre de phases de démarrage et d'arrêt, changements de puissance lents, lit de combustion stable) et une construction industrielle des chaudières. Le nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge de la chaudière à bois en h/a est défini comme la division de la production annuelle de chaleur en kWh/a de la chaudière à bois par la puissance thermique nominale de la chaudière à bois en kW.
- **Durée de fonctionnement**: toute l'année ou pendant la période de chauffage.
- **Condition de faible charge** selon le Tableau En cas de fonctionnement toute l'année, la condition de faible charge doit être remplie en été. En cas de fonctionnement pendant la période de chauffage, elle s'applique pendant la période de transition.
- **Variations de charge**:
  - Des fluctuations de charge importantes et rapides (pics et baisses de charge) se produisent dans les situations suivantes : pics de chauffage le matin, baisse des besoins en chauffage le soir (baisse nocturne), chauffage de l'eau en été (en particulier avec les chauffe-eau instantanés, les modules d'eau fraîche), profils de charge spéciaux (par exemple, stations de sports d'hiver, hôtels sportifs), activation d'un échangeur de chaleur en cas de coupure de courant dans la centrale de chauffage, augmentation ou diminution de la température de départ de la conduite à distance, etc.
  - Une variation quotidienne avec des fluctuations de charge importantes (pics et baisses de charge) se produit dans les situations suivantes : serres (pas de baisse de charge en cas d'ensoleillement, forte baisse de charge par nuit claire), chauffage matinal d'une piscine extérieure, profils de charge irréguliers pour la chaleur industrielle, etc.
- **Charge en bande**, par exemple chaleur industrielle, fonctionnement en charge en bande en raison de la faible puissance nominale de la chaudière à bois par rapport aux besoins en puissance thermique.
- **La gamme de combustibles** impose des exigences au système d'alimentation et de combustion.
- **Investissement dans les installations**

- **Sécurité d'approvisionnement/redondance**: la sensibilité aux pannes du système d'alimentation ou de combustion et donc la sécurité d'approvisionnement dépendent essentiellement du respect de la qualité de combustible définie. La redondance correspond à la puissance thermique (en pourcentage des besoins en puissance thermique) qui peut encore être fournie en cas de panne de la plus grande chaudière.
- **Part du bois-énergie**
- **Prix du combustible**: lorsque les prix du combustible sont bas, on privilégie l'exploitation de l'installation de chauffage au bois pendant toute l'année.
- **Flexibilité/réserve d'extension**: les installations à plusieurs chaudières permettent une utilisation optimale des différentes chaudières à bois lors du raccordement progressif d'une zone d'approvisionnement en chaleur.
- **État de la technique**: les chaudières d'une puissance nominale maximale d'environ 500 kW peuvent fonctionner avec un allumage automatique sans entretien du lit de braises lorsque la teneur en eau du combustible est inférieure à M35 - M40. Cela permet un fonctionnement à faible charge avec de faibles émissions et des pertes énergétiques réduites, ce qui est particulièrement important pour les installations de chauffage au bois monovalentes.
- **Réduction minimale constante de la charge requise**: dans le cas des chaudières à bois équipées d'un système d'alimentation par poussée (« poussoir »), une réduction minimale constante de la charge est nécessaire pour éviter les retours de flamme dans le canal d'alimentation. Les valeurs indicatives suivantes s'appliquent :
  - combustible sec < M35: 30 % de la puissance nominale de la chaudière à bois
  - combustible humide > M40: 20 % de la puissance nominale de la chaudière à bois

Tableau 13.4 Charge de chauffage journalière moyenne minimale en mode de fonctionnement à faible charge sur la base du guide Q [15] (Tableau 20).

| **Type de combustion →** | **Foyers à grille mobile** | | | | | **Foyers volcan et à grille fixe** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Recommandations ↓** | avec allumage automatique | | avec maintien du lit de braises | | | avec allumage automatique | | avec maintien du lit de braises |
| Teneur en eau | ≤ M35 | M35 - 40 | ≤ M35 | M35 - 50 | > M50 | M ≤ M35 | M35 - 40 | ≤ M50 |
| Charge journalière moyenne minimale en pourcentage de la puissance nominale de la chaudière avec accumulateur | 15 | 20 | 15 | 20 | 30 | 10 | 15 | 15 |

**Remarque importante**: les valeurs peuvent varier légèrement selon le fabricant de la chaudière à bois. Les valeurs et recommandations du fabricant de la chaudière à bois font toujours foi.

**Condition de faible charge**

Le respect des conditions de faible charge permet d'éviter les problèmes suivants en cas de faible consommation :

- Nuisances olfactives
- Fumée visible périodiquement
- Risque d'encrassement de la chaudière à bois
- Efficacité réduite du séparateur de particules, car celui-ci n'atteint pas la température de service et n'agit donc que de manière limitée, voire pas du tout, en cas de faible charge. Il en résulte une disponibilité réduite, voire insuffisante, du séparateur.
  - Séparateur de particules électrique : lorsque la température descend en dessous du point de rosée, il existe un risque d'accumulation de particules humides dans le boîtier, sur les isolateurs et sur les électrodes de séparation. Conséquences : court-circuit au niveau des isolateurs, défaillance du nettoyage automatique et de l'évacuation des cendres
  - Filtres en tissu : lorsque la température descend en dessous du point de rosée, il existe un risque d'agglomération de particules humides sur le tissu filtrant. Conséquences: défaillance du nettoyage automatique pouvant aller jusqu'à la destruction du tissu filtrant.
  - Vous trouverez plus de détails sur les procédés de séparation au chapitre 5.8.

Les conditions générales suivantes doivent être respectées:

- En raison de la taille plus importante du lit de combustion (lit de braises), les foyers à grille mobile doivent fonctionner à une puissance minimale plus élevée que les foyers volcan ou à grille fixe.
- L'avantage de l'allumage automatique est qu'il permet une commutation automatique et qu'il supprime la consommation minimale de chaleur pour l'entretien du lit de braises. En fonctionnement à faible charge, cela peut présenter des avantages par rapport à une installation avec entretien du lit de braises.
- Dans les installations avec accumulateur de chaleur et allumage automatique, l'accumulateur peut être entièrement rempli puis vidé à pleine puissance de la chaudière en mode de fonctionnement à faible charge sans qu'il y ait de fluctuations de charge élevées à court terme. Cela permet d'obtenir un fonctionnement continu plus long avec une puissance minimale de la chaudière.

Exemple: puissance maximale de la chaudière à bois = 200 kW ; besoins en chaleur en mode été = 300 kWh par jour ; pertes de stockage et de transport en mode été = 180 kWh par jour.

$$Charge\ journalière\ en\ pourcentage\ de\ la\ puissance\ nom.\ de\ la\ chaudière = \frac{300\frac{kWh}{d} + 180\frac{kWh}{d}}{24\frac{h}{d} * 200\ kW} = 0.10 = 10\%$$

- En utilisant des plaquettes de bois secs de bonne qualité (M ≤ 35 %), cette installation devrait permettre un fonctionnement en été avec un foyer à grille mobile ou fixe, à condition qu'elle soit équipée d'un allumage automatique et d'un accumulateur de chaleur.
- Pour les installations sans fonctionnement estival, le fonctionnement pendant la période de transition doit répondre aux mêmes exigences. Il est donc souvent nécessaire, en cas de faible charge, de continuer à utiliser la chaudière à mazout/gaz (si disponible) ou la petite chaudière à bois (pour les installations monovalentes).

#### 13.5.1.1 Influence des besoins thermiques totaux

Les besoins thermiques totaux déterminent la classe de puissance des variantes de base, réparties dans les groupes suivants :

- 100 kW à 500 kW
- 501 kW à 1'000 kW
- > 1'000 kW

Dans le cas des installations bivalentes, la répartition de la puissance de la chaudière à bois ou des chaudières à bois doit être effectuée sur la base de la courbe de charge annuelle conformément à la Figure 13.5, de manière à atteindre le nombre minimal d'heures de fonctionnement à pleine puissance de la chaudière à bois ou des chaudières à bois, en tenant compte de la charge de chauffage journalière moyenne minimale requise en mode de fonctionnement à faible charge.

Tableau 13.5 Aperçu des variantes de base des systèmes de production de chaleur avec accumulateur en fonction des besoins thermiques totaux sur la base du tableau 19 du guide Q [15]. Les solutions WE1 à WE8 sont décrits en détail dans la partie I des solutions standards [62] et les WE12 à WE16 dans la partie II des solutions standards [71].

| **Solution standard** | **Description** | **Besoins thermiques totaux** | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **100 - 500 kW** | **501 – 1'000 kW** | **> 1'000 kW** |
| **1 chaudière à bois avec accumulateur** WE2 (WE12) | Production annuelle de chaleur avec du bois | 100 % | | |
| | Conception chaudière à bois | 100 % sans pics de charge | | |
| | Nombre d'heures de fonctionnement bois à pleine charge | > 2'000 h/a | | |
| | Fonctionnement à faible charge | Exploitation estival possible si la charge estivale est suffisante selon Tableau 13.4 | | |
| | Allumage automatique ? | Oui | | |
| | Combustible | Maximum P31S ; avec allumage automatique ≤ M40 | | |
| | Réserve d'extension | Possible uniquement dans des cas exceptionnels (difficultés avec faible charge) | | |
| | Capacité de stockage | ≥ 1 h de la puissance nominale de la chaudière à bois | | |
| **1 chaudière à bois + 1 chaudière à fioul/gaz avec accumulateur** WE4 (WE14/16 avec 1 chaudière à bois) | Production annuelle de chaleur avec du bois | 80 - 90 % | | Pour les installations sans fonctionnement estival, il peut être judicieux d'utiliser une seule chaudière à bois + une chaudière à mazout / gaz, même pour une puissance supérieure à 1'000 kW. |
| | Conception Puissance de la chaudière à bois | 50 - 60 %* | | |
| | Conception de la puissance de la chaudière au fioul/gaz | Au minimum 70 %, au maximum 100 %. | | |
| | Nombre d'heures d'exploitation à pleine puissance | > 3'500 h/a<br>Objectif 4'000 h/a | | |
| | Fonctionnement à faible charge | Si Tableau non respecté, par chaudière à mazout/gaz | | |
| | Allumage automatique ? | Oui | | |

| Solution standard | Description | Besoins thermiques totaux | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **100 - 500 kW** | **501 – 1'000 kW** | **> 1'000 kW** |
| | Combustible | Maximum P31S ; avec allumage automatique≤ M40 | Aucune restriction ; avec allumage automatique ≤ M40 | |
| | Réserve d'extension | Possible grâce à une chaudière à mazout/gaz (avec réduction correspondante du taux de couverture en bois) | | |
| | Capacité de stockage | ≥ 1 h de la puissance nominale de la chaudière à bois | | |
| **2 chaudières à bois avec accumulateur** WE6 | Production annuelle de chaleur avec du bois | → Réalisation d'un fonctionnement monovalent en été éventuellement possible uniquement avec deux chaudières à bois | 100 | |
| | Conception Puissance de la chaudière à bois 1 | | 33 % sans pics de charge | |
| | Conception de la puissance de la chaudière à bois 2 | | 67 % sans pics de charge | |
| | Nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge des chaudières à bois 1 + 2 | | > 2'000 h/a | |
| | Fonctionnement à faible charge | | Le respect des prescriptions du Tableau 13.4 est généralement possible avec la petite chaudière à bois | |
| | Allumage automatique ? | | Pour la petite chaudière à bois | |
| | Combustible | | Max. P31S ; avec allumage automatique≤ M40 | Aucune restriction ; avec allumage automatique≤ M40 |
| | Réserve d'extension | | Possible avec des coûts d'investissement élevés (chaudières à bois coûteuses) | |
| | Capacité de stockage | | ≥ 1 h par rapport à 2/3 de la puissance nominale totale des chaudières à bois | |

| Solution standard | Description | Besoins thermiques totaux | | |
|---|---|---|---|---|
| | | **100 - 500 kW** | **501 – 1'000 kW** | **> 1'000 kW** |
| **2 chaudières à bois + 1 chaudière à mazout/gaz avec accumulateur** WE8 (WE14/16 avec 2 chaudières à bois) | Production annuelle de chaleur avec du bois | | | 80 - 90 % |
| | Conception Puissance de la chaudière à bois 1 | | | 17 - 20 %* |
| | Puissance nominale de la chaudière à bois 2 | | | 33 à 40 %* |
| | Conception Puissance de la chaudière à mazout/gaz | | | Min. 100 % – petite chaudière à bois, max. à 100 % |
| | Nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge des chaudières à bois 1 + 2 | | | > 3'000 h/a<br>Objectif 4'000 h/a |
| | Fonctionnement à faible charge | | | Respect du Tableau 13.4 avec petite chaudière bois ou chaudière à mazout/gaz |
| | Allumage automatique ? | | | Pour petite chaudière bois |
| | Combustible | | | Aucune restriction ; avec allumage automatique ≤ M40 |
| | Réserve d'extension | | | Possible grâce à chaudière mazout/gaz (avec réduction du taux de couverture bois) |
| | Capacité de stockage | | | ≥ 1 h par rapport à 2/3 de la puissance nominale totale des chaudières bois |

* Valeur indicative pour les installations destinées principalement au chauffage des locaux

### 13.5.1.2 Détermination de la puissance totale requise pour les chaudières

La puissance totale requise de la chaudière est déterminée comme suit:

- Pour les installations de chaudières à bois **bivalentes**, sur la base des besoins thermiques totaux. Cela correspond au carré bleu de la courbe de charge tirée dans la Figure 13.4 (besoins thermiques totaux, y compris les pics de charge).
- Pour les chaudières à bois **monovalentes** avec accumulateur, sur la base de la puissance thermique totale moyenne requise. Cela correspond au losange noir de la courbe de charge en pointillés dans la Figure 13.4 (valeur moyenne journalière des besoins thermiques totaux sans pics de charge). Cela permet d'éviter un surdimensionnement des chaudières à bois, les pics de charge de courte durée (3 à 4 heures) devant être couverts par l'accumulateur thermique.

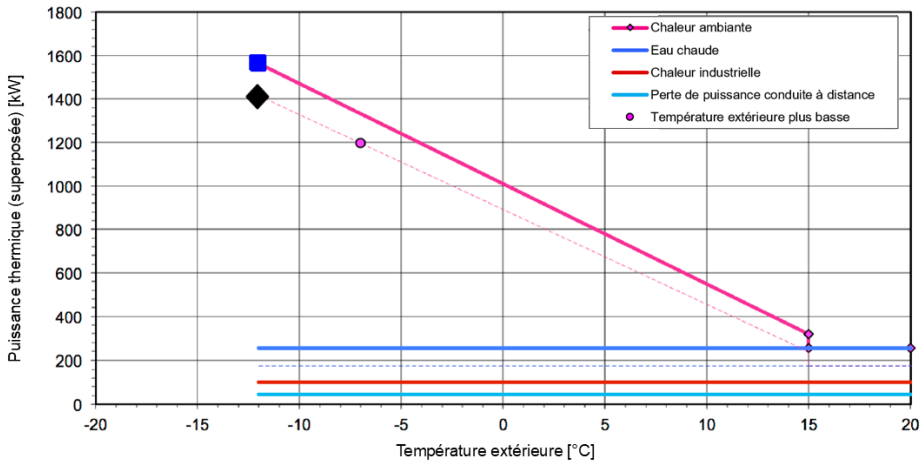



Figure 13.4 Détermination de la puissance totale requise pour une installation de chaudières à bois bivalente ou monovalente à l'aide de la courbe de charge).

### 13.5.1.3 Répartition de la puissance totale des chaudières à bois entre les petites et les grandes chaudières

Dans le cas d'installations de chauffage au bois monovalentes ou bivalentes avec deux ou trois chaudières à bois, le rapport entre la puissance nominale de la petite chaudière à bois et la puissance nominale de la grande chaudière à bois ne doit pas être supérieur à 1 : 2 (plage recommandée 1 : 1 à 1 : 2) (Figure ). Cela permet d'obtenir une **plage de transition commune**, c'est-à-dire une plage de puissance commune, qui permet un fonctionnement optimal des deux chaudières à bois en mode individuel. Cette répartition doit également être respectée dans les installations à plusieurs chaudières équipées d'appareils standards de série.

La plage de transition commune est nécessaire,

- Afin qu'après la mise en service de la plus grande chaudière à bois lors du passage à la saison froide, sa charge minimale requise selon Tableau 13.4 puisse être garantie même en cas de période chaud inattendue, sans avoir à éteindre à nouveau la plus grande chaudière à bois et à remettre en service la plus petite chaudière à bois.
- Afin qu'après l'arrêt de la grande chaudière à bois et la mise en service de la petite chaudière à bois lors du passage à la saison chaude, même pendant une courte période froide, il ne soit pas nécessaire de remettre en service la grande chaudière à bois et d'arrêter à nouveau la petite chaudière à bois.

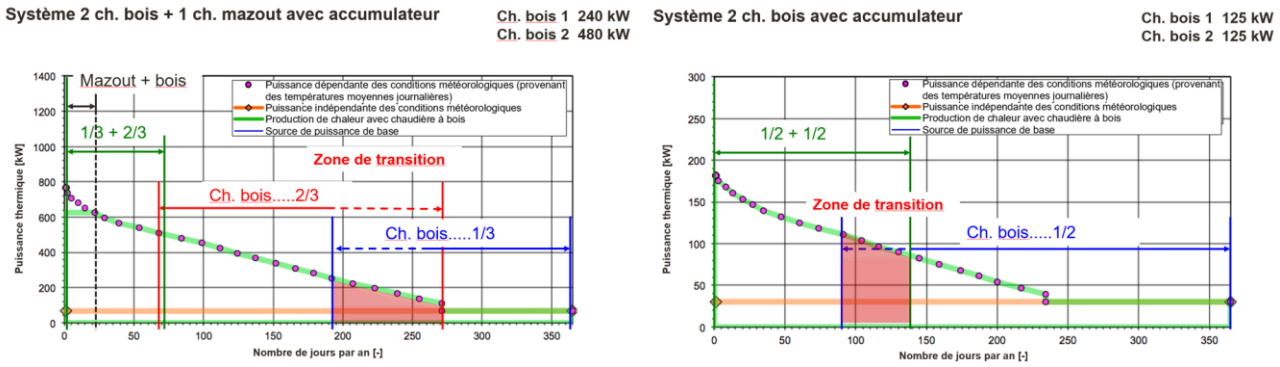



Figure 13.5 Phases d'exploitation et zone de transition pour les installations équipées de deux chaudières à bois, à l'exemple de la courbe annuelle (à gauche avec chaudière fossile, à droite sans chaudière fossile).

Les données détaillées relatives à la courbe annuelle de charge à gauche « Installation bivalente à trois chaudières avec accumulateur » sont les suivantes:

- Charge de chauffage journalière moyenne minimale en fonctionnement à faible charge effective 67 kW
- Petite chaudière à bois 240 kW, charge de chauffage journalière moyenne minimale requise en mode faible charge 48 kW (hypothèse 20 % de la puissance de la chaudière selon Tableau 13.4, combustion à grille mobile, M35 à M50)
- Grande chaudière à bois 480 kW, charge thermique journalière moyenne minimale requise en fonctionnement à faible charge 96 kW (hypothèse 20 % de la puissance de la chaudière selon Tableau 13.4)

Les données détaillées relatives à la courbe annuelle de charge à droite « Installation de chauffage au bois monovalente à deux chaudières avec accumulateur » sont les suivantes:

- Charge de chauffage journalière moyenne minimale effective en mode faible charge 30 kW
- Chaudières à bois 1 et 2 de 125 kW chacune, charge de chauffage journalière moyenne minimale requise en mode faible charge 13 kW (hypothèse 10 % de la puissance de la chaudière selon Tableau 13.4, foyers à alimentation par le bas et à grille fixe, ≤ M35).

## 13.5.2 Description des variantes de base

### 13.5.2.1 Installation de chauffage au bois monovalente avec accumulateur 100 à 500 kW

**Descriptif**

Les installations d'une puissance thermique nominale maximale de 500 kW peuvent fonctionner avec une installation monovalente à une seule chaudière (une chaudière à bois avec accumulateur WE2). L'accumulateur sert à stabiliser le fonctionnement de la chaudière et à couvrir les pics de charge. Ces installations sont relativement peu coûteuses et peu encombrantes. Elles peuvent également servir de base à d'autres phases d'extension.

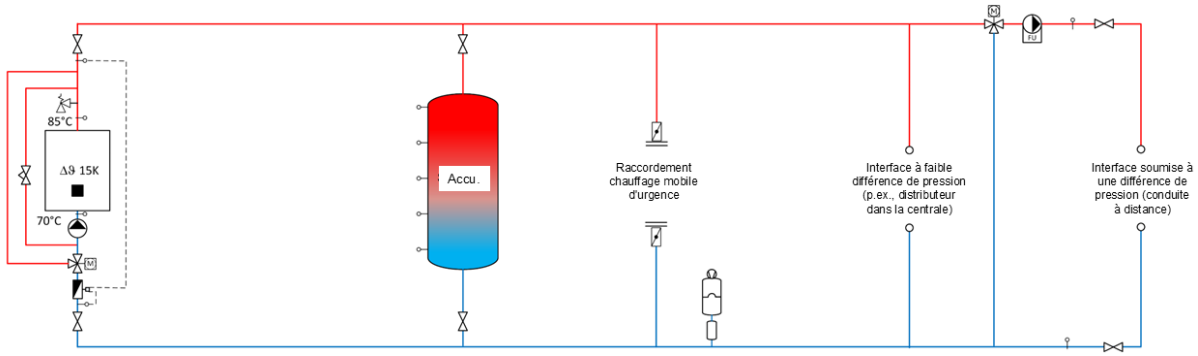



Figure 13.6 Schéma de principe d'une installation avec une chaudière à bois et un accumulateur (WE2).

Les principales **caractéristiques** sont les suivantes :

- Les pics et les baisses de charge à court terme sont compensés par le réservoir.
- Conception de la puissance de la chaudière sans tenir compte des pics de charge (losange noir dans la Figure 13.6)
- Fonctionnement toute l'année avec un besoin exclusif en chaleur pour le chauffage des locaux et l'eau chaude uniquement possible si la charge estivale est suffisamment élevée (conditions de faible charge selon la Tabelle 13.4)
- Pendant la période de transition, la teneur maximale en eau du combustible est limitée à ≤ M40 (allumage automatique nécessaire).
- Variante économique
- Réserves d'extension possibles grâce à l'extension des installations à WE4, 6, etc.
- Stratégie de régulation: la chaudière à bois fonctionne à la puissance la plus faible possible, de sorte que la puissance de la chaudière corresponde exactement à la demande moyenne en puissance thermique. L'état de charge du ballon détermine la puissance requise pour la chaudière. Pendant la période de transition ou en été, si aucune variation importante de charge ne survient à court terme, le ballon est chargé à puissance minimale de la chaudière en mode marche/arrêt. Pour une description détaillée de la régulation, voir Solutions standards - Partie I [62] .

La solution WE2 est **peu adaptée** :

- Lorsque des fluctuations de charge élevées à court terme surviennent et ne peuvent être compensées par le ballon.
- Si les conditions de faible charge ne peuvent pas être respectées en mode été.
- Pour les installations partiellement développées.

**Principes de conception**

| | |
|---|---|
| Production annuelle de chaleur avec du bois | 100 % |
| Conception puissance de la chaudière bois | 100 % sans pics de charge (losange noir dans Figure 13.4) |
| Nombre d'heures d'exploitation à pleine charge | > 2'000 h/a |
| Fonctionnement à faible charge | Fonctionnement estival possible si la charge estivale est suffisante selon Tabelle 13.4 |
| Allumage automatique ? | Oui |
| Combustible | Maximum P31S<br>avec allumage automatique<br>≤ M40 |
| Capacité de stockage | ≥1 h par rapport à la puissance nominale de la chaudière bois |

### 13.5.2.2 Installation de chauffage au bois bivalente avec accumulateur 100 à 1’000 kW

**Descriptif**

Pour augmenter la sécurité d'approvisionnement et/ou dans le cadre d'une extension par étapes, une installation bivalente permet d'obtenir un fonctionnement nettement plus stable pour un surcoût minime. Les installations bivalentes avec une chaudière à bois et un accumulateur sont recommandés jusqu'à une puissance thermique nominale requise de 1’000 kW (une chaudière à bois avec accumulateur et une chaudière à combustible fossile WE4). L'accumulateur thermique sert à stabiliser le fonctionnement de la chaudière. La chaudière à combustible fossile permet de couvrir les pics de charge et, le cas échéant, le fonctionnement en été. Grâce à la chaudière à combustible fossile, il est également possible de couvrir les fluctuations de charge à court terme que l'accumulateur thermique ne peut pas absorber. De plus, la chaudière à combustible fossile garantit la sécurité d'approvisionnement en cas de panne ou de dysfonctionnement de la chaudière à bois. Ces installations sont relativement peu coûteuses et peuvent être exploitées de manière très efficace.

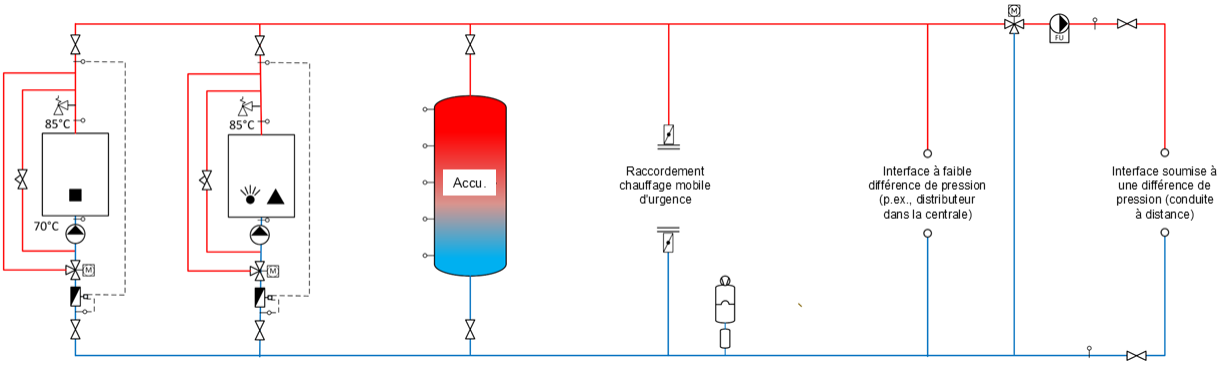



Figure 13.7 Schéma de principe d'une installation avec une chaudière à bois avec accumulateur et une chaudière à combustible fossile (WE4).

Les principales **caractéristiques** sont les suivantes:

- Les pics et les baisses de charge à court terme sont compensés par l'accumulateur de chaleur.
- Conception de la puissance totale de la chaudière, y c. les pics de charge (carré bleu dans la Figure 13.4)
- La puissance de la chaudière à bois correspond jusqu'au point de bivalence à la demande moyenne en puissance thermique, puis à une partie de la charge de chauffage journalière moyenne.
- Couverture des pics de charge avec une chaudière fossile d'appoint
- Fonctionnement à faible charge pendant la période de transition et en été avec une charge suffisante avec la chaudière à bois, sinon avec la chaudière fossile (Tableau 13.4)
- Pour l'allumage automatique, la teneur maximale en eau du combustible est limitée à ≤ M40.
- Variante économique pour un fonctionnement garanti toute l'année avec une grande sécurité d'approvisionnement
- Bonne utilisation de la chaudière à bois avec un taux de couverture élevé correspondant avec du bois énergie
- Réserves à couvrir par la partie fossile de l'installation.
- Production de chaleur extensible sur le plan hydraulique et technique de régulation, p. ex. vers WE8
- Stratégie de régulation: la chaudière à bois fonctionne à la puissance la plus faible possible, de sorte que la puissance de la chaudière corresponde exactement à la demande moyenne en chaleur. L'état de charge de l’accumulateur détermine la puissance requise pour la chaudière à bois. Pour les pics de consommation pendant les jours les plus froids de l'hiver, la chaudière fossile est mise en service et soutient la chaudière à bois. En cas de panne ou de défaillance de la chaudière à bois, le chauffage fossile prend automatiquement le relais. En été, le fonctionnement s'effectue avec la chaudière à bois ou la chaudière fossile, selon le respect des conditions de faible charge. En l'absence de fluctuations de charge importantes à court terme, l’accumulateur est chargé par la chaudière à bois à puissance minimale en mode marche/arrêt (allumage automatique obligatoire). Si la chaudière à bois n'est pas adaptée au fonctionnement à faible charge, la couverture estivale est assurée par la chaudière fossile. Pour une description détaillée des règles, voir Solutions standards - Partie I [62] .
- Les installations sans fonctionnement estival ou avec des besoins élevés en chaleur industrielle peuvent évtl fonctionner à plus de 1’000 kW avec une seule chaudière à bois et une chaudière à combustible fossile.

La solution WE4 est **peu adaptée.**

- Lorsqu’une production de chaleur 100 % sans énergie fossile est exigée.

**Principes de conception**

| | |
|---|---|
| Production annuelle de chaleur à partir du bois | 80 à 90 % |
| Conception puissance chaudière bois | 50 à 60 % des besoins thermiques totaux, pics de charge compris (carré bleu dans Figure 13.4) |
| Conception puissance chaudière fossile | 70 à 100 % des besoins thermiques totaux (redondance élevée) |
| Nombre d'heures d’exploitation à pleine charge chaudière bois | > 3’500 h/a (objectif 4’000 h/a) |
| Fonctionnement à faible charge | Si non respecté: fonctionnement estival avec chaudière fossile |
| Allumage automatique | Oui |
| Combustible | Jusqu’à 500 kW maximum P31S ; avec allumage automatique ≤ M40 |
| Capacité de stockage | ≥ 1 h par rapport à la puissance nominale de la chaudière à bois |

### 13.5.2.3 Installation de chauffage au bois monovalente avec accumulateur 501 à 1’000 kW

**Descriptif**

En répartissant la puissance de la chaudière sur deux chaudières à bois, les installations de grande taille peuvent fonctionner au bois toute l'année (deux chaudières à bois avec accumulateur WE6). Il est recommandé de répartir la puissance à raison de 1/3 pour 2/3. Cela permet généralement de couvrir les faibles charges en été avec la plus petite chaudière et d'assurer un fonctionnement équilibré des deux générateurs de chaleur tout au long de l'année. La petite chaudière doit être équipée d'un allumage automatique. Un accumulateur doit être installé pour stabiliser le fonctionnement de la chaudière et couvrir les pics de charge.

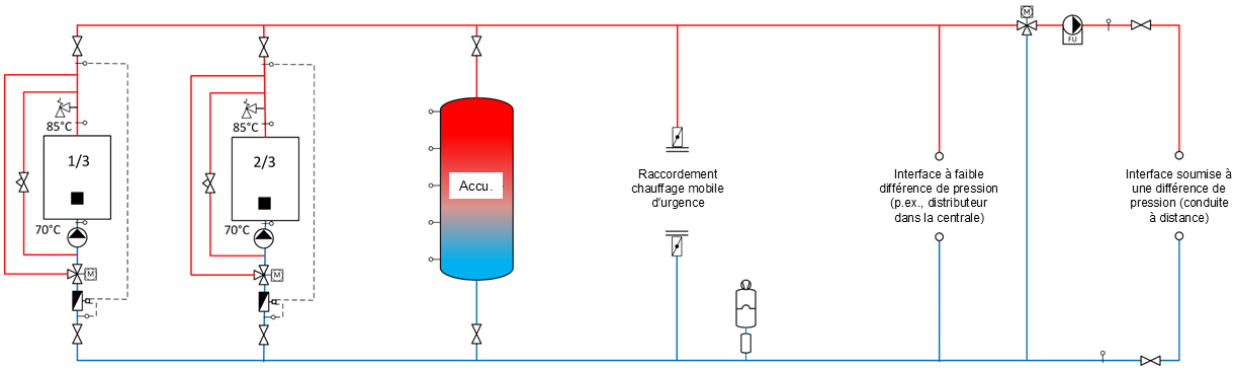



Figure 13.8 Schéma de principe d'une installation avec deux chaudières à bois et un accumulateur (WE6).

**Les** principales **caractéristiques** sont les suivantes :

- Les pics et les baisses de charge à court terme des clients sont compensés par le ballon de stockage.
- Conception de la puissance totale de la chaudière sans pics de charge (losange noir dans Figure 13.4)
- Répartition des puissances de chaudière dans un rapport de 1/3 à 2/3 conformément au chapitre 13.6.1
- Fonctionnement à faible charge pendant la période de transition et en été généralement possible avec une petite chaudière (Tableau 13.4)
- Petite chaudière à allumage automatique, teneur maximale en eau dans le combustible limitée à ≤ M40
- Fonctionnement sans combustibles fossiles toute l'année
- Sécurité d'approvisionnement garantie dans une certaine mesure par la deuxième chaudière à bois en cas de panne de la première. Pour une sécurité d'approvisionnement élevée, il convient de prévoir un raccordement à une centrale de chauffage mobile.
- Raccordement progressif des consommateurs de chaleur possible (coûts d'investissement relativement élevés)
- Production de chaleur extensible sur le plan hydraulique et technique de régulation
- Stratégie de régulation: les deux chaudières à bois fonctionnent à la puissance la plus faible possible (puissance nominale commune identique), de sorte que la somme des puissances des chaudières corresponde exactement à la demande moyenne en puissance thermique. L'état de charge de l’accumulateur détermine la puissance nominale des chaudières. La cascade de chaudières (connexion en série) détermine le fonctionnement des chaudières. En été, si aucune fluctuation importante de la charge ne se produit à court terme, le réservoir est chargé à la puissance minimale de la plus petite chaudière à bois en mode marche/arrêt. Le passage de la plus petite chaudière à bois à la plus grande s'effectue manuellement lorsque la plus petite chaudière à bois ne peut plus couvrir les besoins en chaleur moyens quotidiens. Le passage de la grande chaudière à bois à la petite chaudière à bois s'effectue manuellement lorsque la production quotidienne de chaleur de la grande chaudière à bois (production de chaleur en 24 heures à puissance minimale) est inférieure à 25 % de sa production quotidienne maximale possible (production de chaleur en 24 heures à puissance nominale). La mise en service de la petite chaudière à bois en cas de commutation automatique et de fonctionnement en charge de pointe s'effectue avec l'allumage automatique lorsque la grande chaudière à bois ne peut plus couvrir les besoins en chaleur en moyenne horaire. La petite chaudière à bois n'est à nouveau mise hors service que lorsque les besoins en puissance thermique descendent en dessous de la somme des puissances minimales des deux chaudières à bois. En cas de dysfonctionnement de la plus grande chaudière à bois, la plus petite chaudière à bois est mise en marche avec l'allumage automatique. Pour une description détaillée de la régulation, voir Solutions standards - Partie I [62].

**La solution WE6 n'est pas adaptée**

- En cas de fluctuations de charge élevées à court terme qui ne peuvent être compensées par le réservoir.
- Lorsque les conditions de faible charge en été ne peuvent pas être respectées avec la petite chaudière.

**Principes de conception**

| | |
|---|---|
| Production annuelle de chaleur avec du bois | 100 % |
| Conception puissance chaudières à bois 1 et 2 | 33 % resp. 67 % sans pics de charge (losange noir dans Figure 13.4) |
| Nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge chaudières à bois | > 2’000 h/a |
| Fonctionnement à faible charge | Conformité Tableau 13.4 avec petite chaudière |
| Allumage automatique ? | Oui, pour petite chaudière |
| Combustible | Jusqu’à 1’000 kW max. P31S<br>avec allumage automatique ≤ M40 |
| Capacité de stockage | ≥ 1 h par rapport à au moins 2/3 de la puissance nominale totale des chaudières à bois (mais recommandée ≥ 1 h à 100 % de la puissance nominale totale). |

### 13.5.2.4 Installation de chauffage au bois monovalente avec accumulateur ≥ 1'000 kW

**Descriptif**

Les installations monovalentes à plusieurs chaudières comprenant plus de deux chaudières à bois peuvent être réalisées, par exemple, en tant qu'extension d'installations à deux chaudières WE6 dans le cadre d'un agrandissement par étapes ou lorsque les conditions de faible charge ne peuvent pas être respectées avec la petite chaudière (installation à plusieurs chaudières à bois avec accumulateur).

Les plages de puissance partielle des chaudières doivent être choisies de manière à garantir à la fois une commutation sans problème entre les chaudières et le fonctionnement en été. La répartition de la puissance nominale des chaudières (par exemple 1/5, 2/5 et 2/5) permet d'assurer le fonctionnement tout au long de l'année. La plus petite chaudière doit être équipée d'un allumage automatique. Un accumulateur doit être installé pour stabiliser le fonctionnement de la chaudière et couvrir les fluctuations de charge.

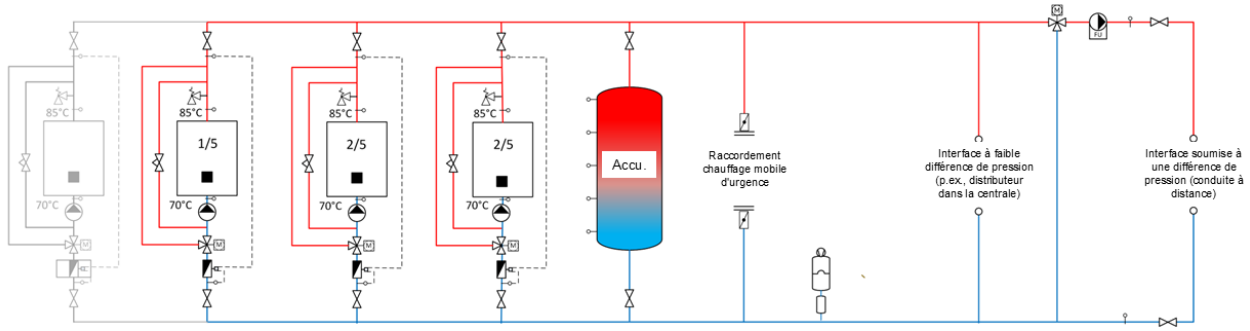



Figure 13.9 Schéma de principe d'une installation avec plusieurs chaudières à bois et un accumulateur (WE6+).

Les principales **caractéristiques** sont les suivantes:

- Les pics et les baisses de charge à court terme des clients sont compensés par le réservoir de stockage.
- Conception de la puissance totale de la chaudière sans pics de charge (losange noir dans Figure 13.4).
- Répartition des puissances des chaudières de manière à garantir le fonctionnement en été et la commutation des chaudières (voir chapitre 13.6.1)
- Fonctionnement à faible charge pendant la période de transition et en été avec la plus petite chaudière (Tableau 13.4).
- Plus petite chaudière (≤ 500 kW) avec allumage automatique, teneur maximale en eau dans le combustible limitée à ≤ M40
- Fonctionnement sans combustibles fossiles toute l'année
- Sécurité d'approvisionnement garantie dans une certaine mesure par les autres chaudières à bois en cas de panne d'une chaudière à bois. Pour une sécurité d'approvisionnement élevée, il convient de prévoir un raccordement à une centrale de chauffage mobile.
- Raccordement progressif des consommateurs de chaleur possible
- Production de chaleur extensible sur le plan hydraulique et technique de régulation
- Stratégie de régulation: les chaudières à bois fonctionnent à la puissance la plus faible possible (puissance nominale commune identique), de sorte que la somme des puissances des chaudières corresponde exactement à la demande moyenne en puissance thermique. L'état de charge de l'accumulateur détermine la puissance prescrite pour les chaudières. La cascade de chaudières (connexion en série) détermine le fonctionnement des chaudières. En été, si aucune fluctuation importante de la charge ne se produit à court terme, le réservoir est chargé à la puissance minimale de la plus petite chaudière à bois en mode marche/arrêt. La commutation des chaudières à bois s'effectue généralement manuellement. Si les besoins en puissance thermique dépassent la somme des puissances nominales des chaudières à bois en service, soit une petite chaudière à bois est désactivée et une grande chaudière à bois est activée, soit une autre chaudière à bois est activée. Si les besoins en puissance thermique descendent en dessous de la somme des puissances minimales des chaudières à bois en service, soit une petite chaudière à bois est désactivée, soit une petite chaudière à bois est activée et une grande chaudière à bois est désactivée. L'activation de la plus petite chaudière à bois avec allumage automatique peut se faire automatiquement grâce à la commutation automatique. En cas de panne d'une grande chaudière à bois, la plus petite chaudière à bois à allumage automatique est mise en service. Pour une description détaillée de la régulation, voir Circuits standard - Partie I [62].

**La solution WE6+ n'est pas adaptée**

- Lorsque des fluctuations de charge élevées à court terme surviennent et ne peuvent être compensées par le stockage.

**Principes de conception**

| | |
|---|---|
| Production annuelle de chaleur avec du bois | 100 % |
| Conception | Puissance totale de la chaudière sans pics de charge (losange noir dans Figure 13.4). Plus petite chaudière selon Tableau 13.4, concevoir les autres chaudières pour commutation sans problème (p. ex. 1/5 vers 2/5 vers 2/5) |
| Nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge chaudières bois | > 2 000 h/a |
| Fonctionnement à faible charge | Conformité au tableau 13.4 avec la plus petite chaudière |
| Allumage automatique? | Oui, pour petite chaudière |
| Combustible | Jusqu'à 1 000 kW maximum P31S avec allumage automatique ≤ M40 |
| Capacité de stockage | ≥ 1 h par rapport à 2/3 de la puissance nominale totale des chaudières à bois (mais recommandée ≥ 1 h à 100 % de la puissance nominale totale). |

### 13.5.2.5 Installation de chauffage au bois bivalente avec accumulateur ≥ 1’000 kW

**Descriptif**

Les installations bivalentes à plusieurs chaudières avec deux chaudières à bois ou plus permettent généralement, même dans le cas d'installations de grande taille, un fonctionnement estival au bois (deux chaudières à bois avec accumulateur et chaudière fossile WE8). Elles peuvent également être réalisées en tant qu'extension d'installations bivalentes WE4 ou d'installations à deux chaudières WE6. Les installations bivalentes se caractérisent par une grande sécurité d'approvisionnement pour un surcoût faible. L'accumulateur sert à stabiliser le fonctionnement de la chaudière à bois. Grâce à la chaudière à combustible fossile, il est également possible de couvrir les fluctuations de charge à court terme que l'accumulateur de chaleur ne peut pas compenser. Ces installations peuvent être exploitées de manière relativement économique et très efficace.

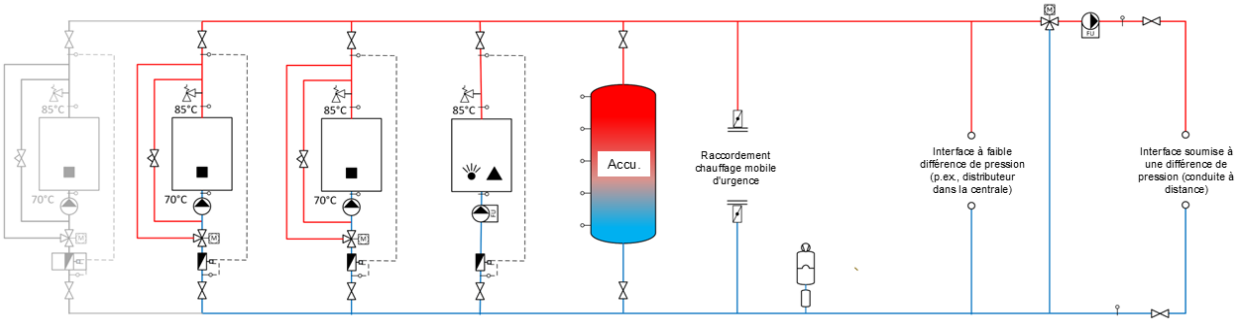



Figure 13.10 Schéma de principe d'une installation avec deux chaudières à bois avec accumulateur et chaudière fossile (WE8).

**Les** principales **caractéristiques** sont les suivantes :

- Les pics et les baisses de charge à court terme des clients chauffage sont compensés par le réservoir.
- Conception de la puissance totale de la chaudière, y c. les pics de charge (carré bleu dans la Figure 13.4)
- Répartition de la puissance de la chaudière de manière à garantir le fonctionnement en été et la commutation de la chaudière (référence croisée à la conception des installations à plusieurs chaudières)
- Fonctionnement à faible charge pendant la période de transition et en été avec la plus petite chaudière à bois (Tableau 13.4)
- Plus petite chaudière à bois (≤ 500 kW) avec allumage automatique, teneur en eau maximale du combustible limitée à ≤ M40.
- Très grande sécurité d'approvisionnement
- Bonne utilisation de la chaudière à bois avec un taux de couverture élevé correspondant avec du bois-énergie
- Réserves à couvrir par la partie fossile de l'installation.
- Raccordement progressif des consommateurs de chaleur possible
- Production de chaleur extensible sur le plan hydraulique et technique de régulation
- Stratégie de régulation : les chaudières à bois fonctionnent à la puissance la plus faible possible (puissance nominale commune identique), de sorte que la somme des puissances des chaudières corresponde exactement à la demande moyenne en puissance thermique. L'état de charge de l’accumulateur détermine la puissance prescrite pour les chaudières. La cascade de chaudières (connexion en série) détermine le fonctionnement des chaudières. En été, si aucune fluctuation importante de la charge ne se produit à court terme, le réservoir est chargé à la puissance minimale de la plus petite chaudière à bois en mode marche/arrêt. La commutation des chaudières à bois s'effectue généralement manuellement. Si les besoins en puissance thermique dépassent la somme des puissances nominales des chaudières à bois en service, soit une petite chaudière à bois est désactivée et une grande chaudière à bois est activée, soit une autre chaudière à bois est activée. Si les besoins en puissance thermique descendent en dessous de la somme des puissances minimales des chaudières à bois en service, soit une petite chaudière à bois est désactivée, soit une petite chaudière à bois est activée et une grande chaudière à bois est désactivée. L'activation de la plus petite chaudière à bois à allumage automatique peut se faire automatiquement grâce à une commutation automatique. La chaudière à combustible fossile est utilisée pour le fonctionnement en période de pointe pendant les jours les plus froids de l'hiver et éventuellement pour le fonctionnement à faible charge en été. La chaudière à combustible fossile est activée ou désactivée en fonction de critères appropriés en cas de fonctionnement en période de pointe. En cas de panne d'une grande chaudière à bois, la plus petite chaudière à bois à allumage automatique est mise en service. En cas de panne complète du système de chauffage au bois, la chaudière à combustible fossile prend le relais pour l'approvisionnement en chaleur. Pour une description détaillée des règles, voir Solutions standards - Partie I [62].

**Principes de conception**

| | |
|---|---|
| Production annuelle de chaleur à partir du bois | 80 à 90 % |
| Conception | Puissance totale de la chaudière 60 %, pics de charge compris (carré bleu dans Figure 13.4), plus petite chaudière selon Tableau 13.4, concevoir les autres chaudières pour commutation sans problème (p. ex. 1/5 vers 2/5 vers 2/5) |
| Nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge chaudières bois | > 3’000 h/a |
| Fonctionnement à faible charge | Respect de la norme Tableau 13.4 avec plus petite chaudière ou couverture fossile |
| Allumage automatique ? | Oui, pour petite chaudière |
| Combustible | Jusqu’à 1’000 kW maximum P31S avec allumage automatique ≤ M40 |
| Capacité de stockage | ≥ 1 h par rapport à 2/3 de la puissance nominale totale des chaudières à bois (mais recommandé ≥ 1 h à 100 % de la puissance nominale totale). |

### 13.5.3 Procédure à suivre pour la conception d'une installation bivalente

Lors de la conception des générateurs de chaleur d'une centrale de chauffage au bois bivalente, les conditions suivantes doivent être prises en compte :

- La **courbe annuelle** de la puissance thermique d'un réseau de chauffage à distance montre, en fonction de l'évolution de la température extérieure, une phase de charge de pointe relativement courte (voir Figure 13.).

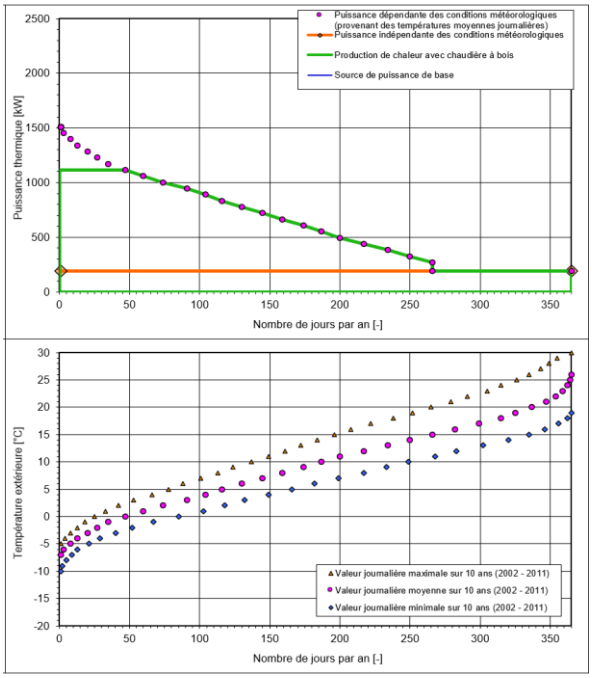



Figure 13.11 Représentation exemplaire de la courbe annuelle d'une centrale de chauffage au bois bivalente. En haut : courbe annuelle de la puissance thermique en moyenne journalière ; en bas : courbe annuelle de la température extérieure en moyenne journalière.

- La **structure** des coûts des systèmes de production de chaleur varie. Les coûts d'investissement des chaudières à bois sont élevés et les coûts de combustible faibles, tandis que les chaudières à mazout et à gaz ont des coûts d'investissement relativement faibles, mais des coûts de combustible élevés.

Tableau 13.6 Structure des coûts de différents systèmes de production de chaleur.

| Installation de combustion | Coûts d'investissement (coûts fixes) | Coûts de combustible (coûts variables) |
|---|---|---|
| Bois | élevés | faible |
| Mazout, gaz | faible | élevé |

- Au vu de ces conditions, il est recommandé de répartir la puissance thermique maximale requise du réseau de chaleur entre une installation de chauffage au bois pour **couvrir la charge** de base et la charge moyenne, et une installation au mazout/gaz pour **couvrir la charge de pointe** et servir de réserve en cas de panne. Avec cette variante, une production de chaleur neutre en $CO_2$ ne peut être obtenue que si la source d'énergie fossile est remplacée par une source d'énergie renouvelable telle que le biogaz (liquide), le biofioul ou un combustible bois de haute qualité (granulés, plaquettes de bois de qualité).

  La répartition de la puissance thermique d'une installation bivalente doit en principe être déterminée en fonction de l'optimisation des coûts. Cependant, d'autres conditions cadres doivent également être prises en compte, telles que la part maximale d'énergies fossiles autorisée par l'organisme de financement, la baisse de l'acceptation de l'utilisation des énergies fossiles par la population et les maîtres d'ouvrage (transition thermique vers une production de chaleur neutre en $CO_2$).

- Pour les installations plus importantes, il est judicieux de diviser le système de chauffage au bois en deux chaudières à bois. Le critère suivant est important à cet égard:
  - La dégression des coûts d'investissement constitue dans ce contexte un critère de décision important, ce qui signifie qu'une division en deux chaudières à bois pour une puissance nominale totale inférieure à environ 2 MW doit être examinée avec soin d'un point de vue économique.

L'expérience de QM Chauffages au bois montre que le respect des exigences de qualité selon le Tableau 13.4 permet non seulement de garantir un fonctionnement techniquement irréprochable avec de faibles émissions, mais aussi que ces installations sont également les plus intéressantes sur le plan économique.

### 13.5.4 Choix du système de combustion

La puissance requise pour une ou plusieurs chaudières est déterminée en fonction du choix du système de production de chaleur et des bases de conception correspondantes.

Les différents systèmes de combustion sont plus ou moins adaptés aux différents domaines d'application. Les critères les plus importants pour le choix du système de combustion sont les suivants :

- Puissance de la chaudière
- Assortiment de bois-énergie conformément au chapitre 13.3
- Mode de fonctionnement en charge continue et en charge faible (voir exigences Tableau 13.4).

### 13.5.5 Dimensionnement de l'accumulateur de chaleur

Afin que la puissance requise de la chaudière à bois puisse être atteinte plus lentement que son temps de réaction, un accumulateur de chaleur présentant les fonctions suivantes est généralement nécessaire :

- Compensation des pics et des baisses de charge à court terme qui sont plus rapides que le temps de réaction de la chaudière à bois (selon la capacité de stockage spécifiée).
- Détection de l'évolution de la charge en fonction de la modification de l'état de charge de l'accumulateur.

En principe, il est recommandé d'opter pour une capacité de stockage ≥ 1 h par rapport à la puissance nominale de

la chaudière à bois. Il convient également de tenir compte des éventuelles prescriptions légales. Toutefois, si des pics de charge (à court terme) et des baisses de charge importants surviennent au cours de la journée, comme c'est le cas par exemple pour les serres, la chaleur industrielle ou les réchauffeurs d'air, ceux-ci ne peuvent être compensés qu'avec une capacité de stockage nettement plus importante. Il convient donc de tenir compte des recommandations suivantes dans les cas suivants:

- **Serres**: afin de compenser les pics de charge des serres (la nuit en raison du rayonnement froid) et les baisses de charge (le jour en raison du rayonnement solaire) au cours de la journée, la capacité de stockage doit être augmentée à 4 à 6 h de la puissance nominale de la chaudière à bois. La puissance nominale de la chaudière à bois doit être conçue pour environ 50 % des besoins maximaux en puissance thermique. Cela entraîne une augmentation correspondante de la charge de travail ou du nombre d'heures de fonctionnement à pleine capacité.
- **Chaleur industrielle** 2 h - 8 h
- **Réchauffeur d'air** 1.5 h - 2 h
- **Production d'eau chaude** 1.5 h - 2 h
  (p. ex. stations d'eau fraîche)
- Chauffage **de la piscine extérieure** 1.5 h - 2 h

Afin d'éviter un surdimensionnement des chaudières à bois d'une **installation monovalente avec accumulateur**, les pics de charge à court terme (3 à 4 h) doivent être couverts par l'accumulateur conformément à la courbe de charge étirée. Le volume du ballon doit avoir une capacité de stockage suffisante pour compenser la courbe de charge de manière que l'installation de chaudières à bois puisse suivre la consommation moyenne ou la courbe de charge en pointillés (voir Figure 11.1).

Si vous avez **deux chaudières à bois ou plus,** le volume de stockage minimum de ≥ 1 h peut être calculé sur la base des 2/3 de la puissance nominale totale des chaudières à bois.

Le volume de stockage requis est calculé dans le tableau Excel **«** Relevé de situation, dossier centrale thermique **»**. La capacité de stockage est déterminée directement à partir de l'écart de température dans le réservoir. QM Chauffages au bois stipule que l'écart de température dans le réservoir doit être supérieur à 30 K. Une différence de température de 40 K permet d'augmenter considérablement la capacité de stockage d'un volume de stockage existant par rapport à une différence de température de 30 K. Une température de départ élevée constante et une température de retour basse constante sont nécessaires pour une gestion optimale du stockage.

Vous trouverez de plus amples informations sur le fonctionnement des accumulateurs de chaleur, y compris les conditions préalables à une gestion optimale de l'accumulateur de chaleur, au chapitre 7.5.

## 13.5.6 Besoins en combustible bois

Les besoins annuels en combustible pour le bois (t/an ou m3/an) sont calculés à partir des besoins annuels en énergie primaire (par exemple en MWh/a) et du contenu énergétique spécifique du combustible (p.ex. en MWh/t).

Dans le cas d'une production de chaleur monovalente, les besoins annuels en énergie primaire pour le bois correspondent aux besoins annuels en chaleur de l'ensemble de l'installation, divisés par le rendement annuel $\eta_a$ de la chaudière à bois.

Dans le cas d'une production de chaleur bivalente, seule la part des besoins annuels en chaleur couverte par les chaudières à bois (part biogène de la production annuelle de chaleur) est prise en compte pour déterminer les besoins en énergie primaire pour le bois. Celle-ci dépend de la répartition de puissance choisie et de la courbe de charge annuelle de l'ensemble de l'installation et correspond en règle générale à 80 à 90 % des besoins annuels en chaleur de l'ensemble de l'installation. En divisant cette part par le rendement annuel $\eta_a$ de l'installation de chaudières à bois, on obtient les besoins annuels en énergie primaire pour le bois. Dans le tableau Excel « Relevé de situation », cela est indiqué dans le classeur « *Figures* ou *tableau Q-Plan »*.

**Les pertes de production de** chaleur $Q_{VWE}$ sont calculées à partir du rendement annuel de la production de chaleur $\eta_a$. La détermination du rendement annuel des chaudières à bois est décrite au chapitre 20.12. Les pertes de production de chaleur $Q_{VWE}$ sont influencées par:

- les pertes d'exploitation, respectivement le rendement de la chaudière
- les pertes de disponibilité
- le taux d'utilisation
- le niveau de charge moyen.

## 13.6 Autres variantes du système de production de chaleur

### 13.6.1 Installations à plusieurs chaudières avec des appareils standards de série

Les chaudières à bois économiques en tant qu'appareils standards de série jusqu'à une puissance nominale d'environ 500 kW, avec des exceptions jusqu'à 1’500 kW, permettent, en tant qu'installations à plusieurs chaudières monovalentes (« installations en cascade », par exemple 3 à 6 chaudières à bois), de couvrir les besoins en puissance thermique d'une centrale de chauffage au bois jusqu'à environ 2 MW et plus.

En combinaison avec un accumulateur de chaleur qui permet une puissance optimale et une régulation en cascade optimale avec mise en marche et arrêt automatiques (avec allumage automatique) des différentes chaudières à bois, celles-ci peuvent fonctionner en continu tout au long de l'année, en particulier en période de faible charge pendant la mi-saison et en été (voir Tableau 13.4), avec un taux d'utilisation élevé et de faibles pertes en veille. Cela permet d'obtenir un rendement annuel global élevé $\eta_a$.

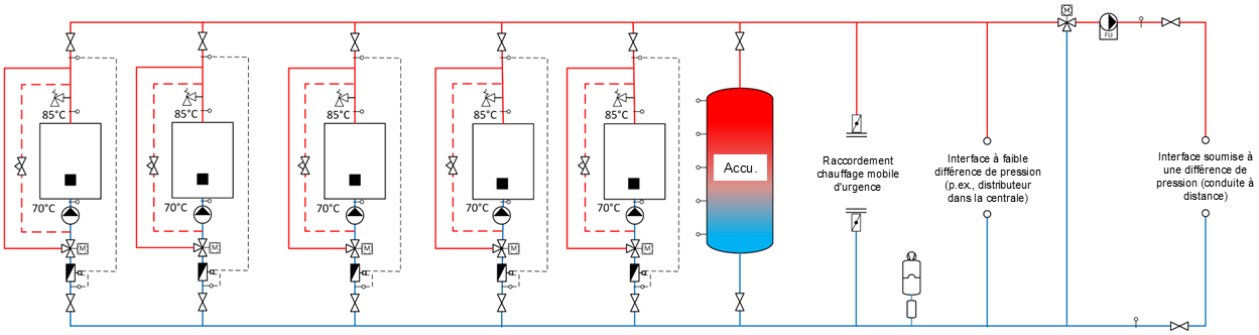



Figure 13.12 Schéma de principe d'une installation à plusieurs chaudières (« installation en cascade ») avec des appareils standards de série.

Il convient de noter que les chaudières à bois standards avec grille fixe et alimentation par le bas effectuent un **intervalle de décendrage et de nettoyage** automatique de la grille fixe (avec grille basculante) ou de la grille tournante après une durée de fonctionnement prédéfinie, par exemple 6 à 8 heures. Le combustible sur la grille est alors entièrement brûlé en cendres pendant la phase de combustion. Le nettoyage mécanique de la grille a ensuite lieu avant que la chaudière à bois ne redémarre avec l'allumage automatique. L'intervalle de nettoyage est d'environ 30 à 45 minutes.

Pendant l'intervalle de nettoyage d'une chaudière à bois, il faut éviter qu'une autre chaudière à bois ne soit mise en service avec un démarrage à froid pour pallier le processus de nettoyage, puis arrêtée dès que la chaudière nettoyée est de nouveau en phase de fonctionnement stationnaire.

En cas de panne d'une chaudière à bois, les chaudières à bois restantes garantissent une sécurité d'approvisionnement élevée (redondance).

Les installations à plusieurs chaudières avec des appareils standards de série offrent une grande flexibilité lors de l'extension d'un réseau de chaleur, car la configuration de base permet déjà d'utiliser les différentes chaudières à bois à faible charge.

Exigences relatives au **combustible** (voir chapitre 13.3):

- Pellets
- Plaquettes de bois de qualité PFS et RI-P16S-M20* ainsi que PFS et RI-P31S-M20
- PFS et RI-P31S-M35 (à partir d'une puissance de chaudière > 200 kW avec foyer à grille mobile)

La qualité élevée requise du combustible augmente considérablement les coûts d'exploitation en raison du prix plus élevé du combustible. Cela a un impact particulier sur la rentabilité des installations à plusieurs chaudières avec une puissance nominale totale élevée.

**Principes de conception**

| | |
|---|---|
| Production annuelle de chaleur avec du bois | 100 % |
| Conception | Puissance totale de la chaudière sans pics de charge (losange noir dans Figure 13.4)<br>La plus petite chaudière selon Tableau 13.4, concevoir les autres chaudières pour commutation sans problème (p.ex. 1/5 vers 2/5 vers 2/5) |
| Nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge chaudières bois | > 2 000 h/a |
| Fonctionnement à faible charge | Conformité au Tableau avec la plus petite chaudière |
| Allumage automatique ? | Oui, pour les petites chaudières (< 500 kW) |
| Combustible | Pellets, plaquettes de bois de qualité PFS- et RI-P16S-M20* ainsi que PFS- et RI-P31S-M20 ou PFS- et RI-P31S-M35 (à partir d'une puissance de chaudière > 200 kW avec foyer à grille mobile) |
| Capacité de stockage | ≥ 1 h par rapport à 2/3 de la puissance nominale totale des chaudières à bois (mais recommandée ≥ 1 h à 100 % de la puissance nominale totale). |

### 13.6.2 Chaudière à bois supplémentaire avec combustible de haute qualité pour le fonctionnement en été

En cas de faible besoin en chaleur pendant la période de transition ou en été, dans une installation monovalente équipée de deux chaudières à bois, la charge nécessaire (charge de chauffage journalière moyenne minimale requise en mode de fonctionnement à faible charge selon le Tableau 13.4) n'est parfois pas atteinte pour la ou les chaudières à bois les plus grandes, car celles-ci ont une charge minimale requise plus élevée en raison de leur taille et des combustibles de référence généralement utilisés.

Afin de bénéficier d'une plus grande flexibilité dans la conception et l'exploitation des installations, une chaudière à bois supplémentaire (chaudière d'été) de faible puissance peut constituer un complément judicieux pour couvrir de manière flexible et efficace le fonctionnement en été ou à faible charge (voir Figure 13.). On utilise généralement des appareils de série conçus pour fonctionner avec des combustibles de haute qualité (granulés ou plaquettes de bois de qualité) et équipés d'un allumage automatique. Ils constituent une alternative judicieuse aux chaudières à combustibles fossiles, à biodiesel et à biogaz, afin de permettre une production de chaleur 100 % neutre en $CO_2$.

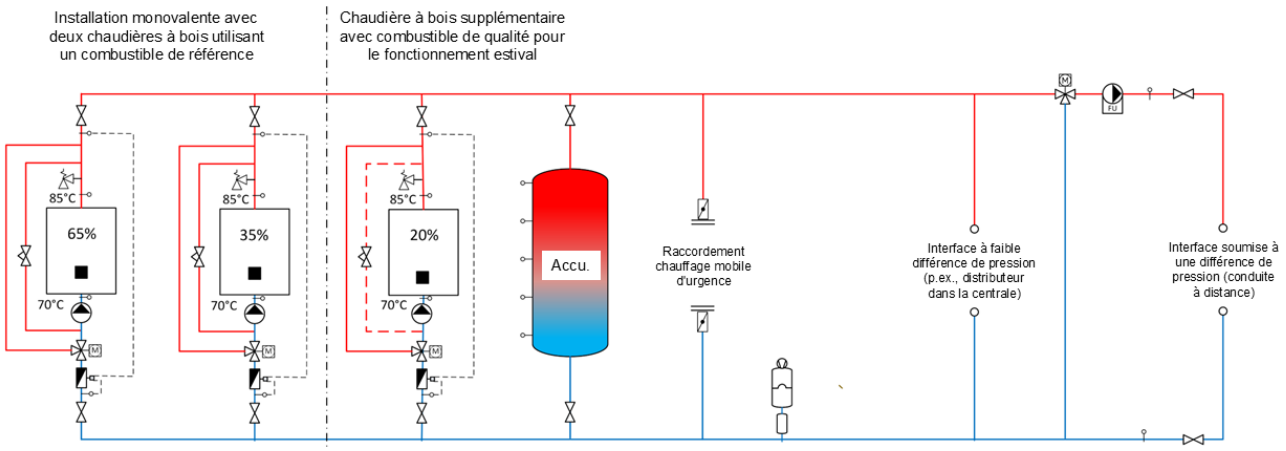



Figure 13.13 Schéma de principe d'une installation monovalente avec deux chaudières à bois et une chaudière à bois supplémentaire avec un combustible de qualité pour le fonctionnement en été.

L'objectif de la conception de la chaudière à bois supplémentaire est d'optimiser l'utilisation de la chaudière à bois pour la production de chaleur destinée à l'alimentation en eau chaude en été.

À cette fin, la puissance de la chaudière ou la puissance totale d'une ou plusieurs chaudières à bois supplémentaires doit être dimensionnée au minimum pour deux fois la charge de chauffage journalière moyenne maximale requise en été. Dans le cas d'un système comprenant uniquement une grande chaudière à bois et une chaudière à bois supplémentaire, il convient éventuellement de dimensionner pour trois fois la charge de chauffage journalière moyenne maximale requise en été. Ceci en supposant qu'il existe une capacité de stockage suffisante pour équilibrer la charge journalière de manière que la chaudière à bois supplémentaire puisse suivre la charge journalière moyenne en mode été. Cela permet également de couvrir la période de transition avec la chaudière à bois supplémentaire (voir Figure 13.5), pendant laquelle la chaudière à bois plus grande pourrait déjà être utilisée.

Pour les appareils de série, il convient de tenir compte des exigences spécifiques relatives au **combustible,** comme pour les installations à plusieurs chaudières équipées d'appareils standards de série (voir chapitre 13.6.1).

S'il n'y a pas de stockage et d'alimentation en combustible séparés, il faut s'assurer que le stock de combustible contient le combustible de haute qualité requis au moment de la mise en service de la chaudière à bois supplémentaire.

En cas de perturbation de l'alimentation en combustible, aucune des chaudières ne peut fonctionner.

En cas de stockage et d'approvisionnement séparés en combustible, la chaudière à bois supplémentaire peut également fonctionner en même temps que les autres chaudières et être utilisée pour couvrir les pics de consommation, assurer la redondance ou augmenter la sécurité d'approvisionnement en cas de panne.

En cas d'utilisation de granulés pour la chaudière d'appoint, un stockage supplémentaire de granulés doit être prévu, par exemple un silo en tissu.

Si une installation solaire thermique centrale est disponible, les chaudières à bois supplémentaires à allumage automatique et à grande flexibilité offrent la possibilité d'une réserve de secours pour l'installation solaire thermique. Cependant, la question de la pertinence et de la rentabilité d'une chaudière à bois supplémentaire se pose, car la production de chaleur et donc l'utilisation de la chaudière à bois supplémentaire sont fortement limitées. L'utilisation requise de la chaudière à bois supplémentaire selon le Tableau 13.4 ne peut être garantie à tout moment. C'est pourquoi ces phases de fonctionnement doivent être réduites au minimum (voir chapitre 13.7.4.3). Lorsque la chaudière à bois supplémentaire est mise en service, elle doit fonctionner de manière continue pendant plus de 8 heures à une puissance minimale. Le réservoir ne doit être chargé que partiellement afin que l'installation solaire thermique puisse à nouveau être utilisée au maximum le lendemain.

### 13.6.3 Cogénération

Pour une utilisation énergétique efficace et tournée vers l'avenir du potentiel du bois énergie, il convient également d'envisager l'installation de systèmes de cogénération également appelés de couplage chaleur-force (CCF).

Dans le cadre de la production d'électricité à partir de la biomasse, il convient toujours d'utiliser la chaleur produite afin d'optimiser l'efficacité des ressources. Dans le cas contraire, l'utilisation de la biomasse pour la production d'électricité n'est pas recommandée. La plage de modulation de ces installations est relativement faible, de sorte qu'elles doivent généralement toujours fonctionner à leur puissance nominale et fournir ainsi de l'énergie en ruban. Les procédés suivants sont adaptés à cet effet :

- Turbine à vapeur
- Moteur à vapeur
- Cycle organique de Rankine (ORC)
- Moteur à gaz
- Turbine à gaz chaud

Le manuel de planification du chauffage à distance décrit plus en détail les différents procédés (voir [19] au chapitre 2.9).

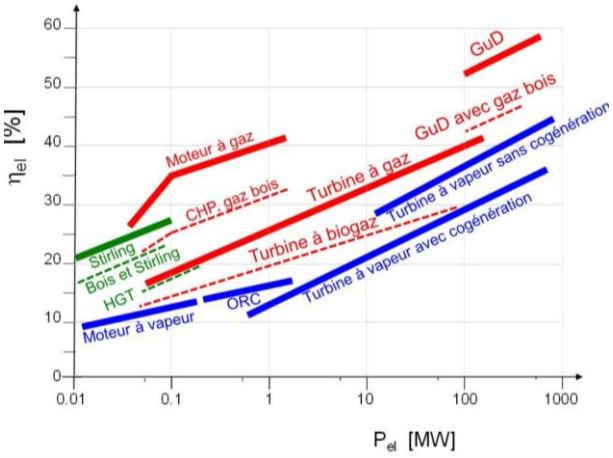



Figure 13.14 Rendements électriques nets de différentes technologies de production d'électricité en fonction de la puissance électrique [19] .
CCGT = centrale à cycle combiné gaz-vapeur,
HGT = turbine à gaz à haute température (avec combustion de bois).

La Figure 13. montre que les technologies de cogénération couvrent une plage de puissance électrique allant de quelques kW à plus de 1 GW. Les rendements électriques nets réalisables varient entre moins de 10 % et 60 %. Dans les procédés établis de la technologie à vapeur, les rendements électriques présentent une forte dépendance à l'échelle, allant de moins de 10 % pour des puissances à partir de 10 $kW_{el}$ à environ 45 % pour les grandes installations. D'autres technologies, telles que la gazéification du bois et les moteurs Stirling, atteignent des rendements électriques plus élevés dans la plage de puissance faible à moyenne. La production d'électricité à partir de la biomasse est indépendante des conditions météorologiques et des saisons et convient à l'exploitation en charge de base et à la stabilisation du réseau électrique.

Dans le cas de la gazéification du bois, il convient de veiller à la qualité du combustible. En règle générale, un combustible homogène et séché, tel que des plaquettes de bois de qualité PFS/RI-P16S/P31S–M10, est nécessaire. En fonction du fabricant, du type de construction, de la technologie et de la taille de l'installation, la gamme de combustibles utilisables doit être clarifiée au cas par cas. Outre la production d'électricité et de chaleur, la gazéification du bois permet également de produire du charbon de bois.

Les installations de cogénération au bois présentent les coûts de production d'électricité indicatifs suivants :

- Procédé à vapeur avec chaudière à vapeur et turbine à vapeur :
  10 - 20 c€/kWh (15 – 30 cts/kWh)
- Procédé ORC avec chaudière à huile thermique et module ORC :
  15 – 25 c€/kWh (20 – 35 cts/kWh)
- Procédé de gazéification avec moteur à gaz :
  15 – 30 c€/kWh (25 – 40 cts/kWh)

La rentabilité doit être examinée en détail en fonction des conditions du marché (tarifs de rachat réalisables/couverture des besoins propres en électricité par rapport aux coûts de production d'électricité) et des conditions techniques (capacité de fonctionnement à charge partielle, taux d'utilisation, fonctionnement en fonction de la chaleur/rendement global de l'installation, etc.) et de comparer, le cas échéant, les coûts de production d'électricité réalisables avec ceux d'autres sources d'électricité renouvelables.

# 13.7 Sources de chaleur complémentaires et systèmes de production de chaleur

## 13.7.1 Remarques générales

L'exigence d'une production de chaleur neutre en $CO_2$ dans le cadre de la transition thermique est un défi qu'il convient de relever. Pour couvrir les pics et les creux de consommation, des options supplémentaires aux variantes de base des systèmes de production de chaleur avec chaudière à bois (chapitre 13.5.1) peuvent s'avérer nécessaires. Une autre possibilité consiste à intégrer des chaudières décentralisées existantes, si elles sont disponibles. En fonction de l'infrastructure, des techniques de mesure et de régulation nécessaires, il convient d'examiner au cas par cas si les générateurs existants (par exemple, chaudières à pellets ou à gaz, centrales de cogénération) peuvent être intégrés dans un réseau prévu.

Une couverture fossile des pics de consommation ne peut pas répondre à l'exigence de décarbonisation. À l'avenir, la production de chaleur pour les réseaux de chaleur (réseaux thermiques) devrait donc être assurée de manière croissante par plusieurs sources d'énergie renouvelables.

Les sources de chaleur complémentaires peuvent être les suivantes:

- Chaleur résiduelle provenant des gaz d'échappement de l'installation de combustion du bois pour une utilisation directe et indirecte avec une pompe à chaleur
- Chaleur résiduelle des installations frigorifiques pour une utilisation directe et indirecte avec une pompe à chaleur
- la chaleur résiduelle provenant des eaux usées et des stations d'épuration (STEP) pour une utilisation indirecte avec une pompe à chaleur
- la chaleur résiduelle issue des processus industriels pour une utilisation directe et indirecte avec une pompe à chaleur
- Chaleur ambiante provenant des couches d'air proches du sol, des eaux de surface et de la géothermie proche de la surface pour une utilisation indirecte avec une pompe à chaleur
- Géothermie jusqu'à environ 500 mètres de profondeur et géothermie à des profondeurs plus importantes pour une utilisation directe ou indirecte avec une pompe à chaleur, y compris l'utilisation des eaux souterraines

Les systèmes de production de chaleur complémentaires sont les suivants:

- Pompes à chaleur
- Installations solaires thermiques
- Chaudières au biogaz/bio-huile
- Centrales de cogénération au biogaz/biofioul (centrales de cogénération)

L'interaction entre l'installation de chauffage au bois et les sources de chaleur et systèmes de production de chaleur complémentaires est déterminée par la disponibilité de la source de chaleur ou du système de production de chaleur.

Les exigences relatives à la charge de chauffage journalière moyenne minimale en mode de fonctionnement à faible charge selon le Tableau , et à l'utilisation annuelle des chaudières à bois (nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge) déterminent le domaine d'application dans lequel l'installation de chauffage au bois peut fonctionner de manière efficace sur le plan énergétique et avec de faibles émissions.

Les objectifs suivants doivent être pris en compte lors de la combinaison d'une installation de chauffage au bois avec des sources de chaleur complémentaires ou des systèmes de production de chaleur complémentaires :

- Substitution des énergies fossiles pour une production de chaleur neutre en $CO_2$
- Utilisation énergétique efficace du potentiel du bois énergie. Le potentiel limité doit être exploité de manière optimale.
- Remplacer le bois-énergie et la biomasse sèche par d'autres sources d'énergie renouvelables, lorsque cela est possible et judicieux. Il convient d'élargir le potentiel des sources d'énergie renouvelables et de les utiliser de manière optimale.
- Éviter les « situations de concurrence » entre les différentes sources d'énergie renouvelables : privilégier la combinaison plutôt que la concurrence !

Pour une mise en œuvre réussie des sources de chaleur et des systèmes de production de chaleur complémentaires mentionnés, il faut toujours tenir compte des exigences de base des technologies choisies. Ainsi, certaines technologies nécessitent, pour gagner en efficacité, des températures de retour basses dans le réseau de chaleur, avec une valeur cible de 40 °C, ou des températures de départ basses dans le réseau de chaleur, avec une valeur cible de 70 °C.

Avec les options supplémentaires, il convient de veiller, lors de la conception des puissances de la chaudière à bois, à ce que les chaudières à bois fonctionnent à la charge minimale requise conformément au Tableau . L'utilisation des options supplémentaires peut réduire le nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge des chaudières à bois, de sorte que les valeurs requises dans le Tableau 13.5, ne peuvent plus être respectées.

La conception et le fonctionnement de l'ensemble de l'installation doivent être choisis de manière que les exigences de base énoncées au chapitre 13.3**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** puissent être respectées à tout moment.

## 13.7.2 Récupération de la chaleur à partir des gaz d'échappement

### 13.7.2.1 Remarques générales

Après avoir quitté la chaudière ou le système d'épuration des gaz de combustion, les gaz de combustion peuvent encore atteindre des températures comprises entre 120 °C et > 160 °C et présenter un contenu énergétique élevé en fonction de la conception et des conditions de fonctionnement. La Figure 13. montre le potentiel d'augmentation du rendement de la chaudière grâce à l'utilisation d'économiseurs et d'installations de condensation des gaz d'échappement. En conséquence, pour une utilisation énergétique efficace du bois énergie, il convient d'examiner les variantes de récupération de chaleur (WRG) à partir des gaz d'échappement décrites ci-dessous. Vous trouverez de plus amples informations au chapitre 5.9.

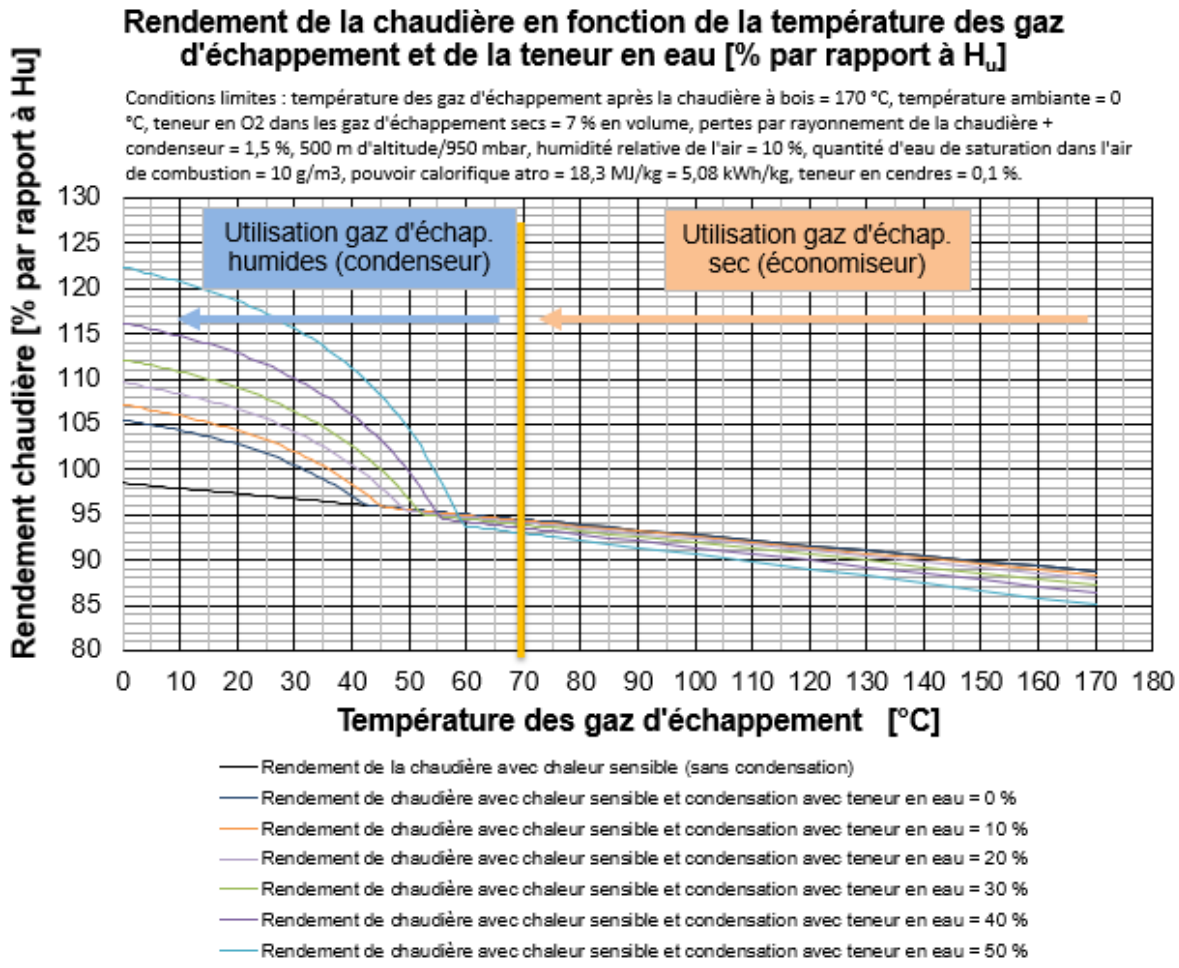



Figure 13.15 Rendement de la chaudière en fonction de la température des gaz d'échappement et de la teneur en eau. Utilisation des gaz d'échappement secs avec économiseur, utilisation des gaz d'échappement humides avec condensation des gaz d'échappement (source Verenum AG).

### 13.7.2.2 Économiseur

À la sortie du séparateur de particules, les gaz d'échappement présentent des températures comprises entre 120 °C à charge partielle et 160 °C à la puissance nominale de la chaudière. Dans l'économiseur, la chaleur sensible est récupérée en refroidissant les gaz d'échappement à environ 70 °C (environ 15 K au-dessus du point de rosée). Avec une utilisation annuelle élevée de la chaudière, il est possible d'atteindre un taux de récupération de chaleur supplémentaire de 5 à 7 % de la quantité de chaleur produite par la chaudière à bois.

Sur le plan hydraulique, l'économiseur est généralement intégré en série au retour principal après le réservoir (côté chaudière) (voir la Figure 13.1 schéma à gauche). Une intégration hydraulique de l'économiseur en parallèle à la chaudière à bois (voir la Figure 13.1, schéma à droite), c'est-à-dire comme un générateur de chaleur supplémentaire, doit être envisagée lorsque la température de départ principale est < 85 °C, la température de retour principale > 65 °C ou lorsque le fluide caloporteur de la chaudière à bois (p. ex. huile thermique, vapeur ou eau chaude) est > 110 °C et que la chaleur produite par l'économiseur peut être transférée à un système d'eau chaude. Vous trouverez de plus amples infos dans les chapitres 5.4 et 5.9.

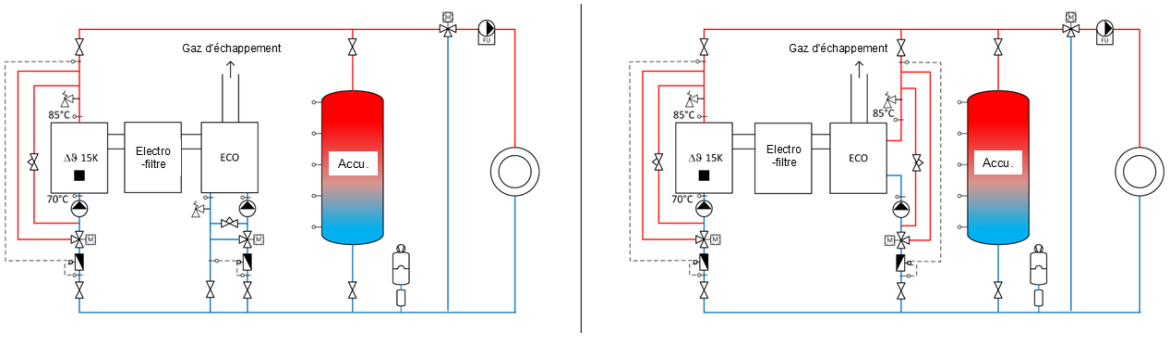



Figure 13.1 Schéma de principe d'une installation avec intégration d'un économiseur en série dans le retour (à gauche) ou en parallèle (à droite).

### 13.7.2.3 Condensation des gaz d'échappement

Dans l'installation de condensation des gaz d'échappement, la chaleur sensible et la chaleur latente contenues dans les gaz d'échappement sont récupérées. Les gaz d'échappement sont refroidis bien en dessous du point de rosée afin d'obtenir une récupération maximale de la chaleur.

Afin d'atteindre un taux de récupération de chaleur > 10 % ou une valeur cible > 15 %, les conditions suivantes doivent être respectées:

- Température de retour basse du système de chauffage
- Excès d'air λ en phase de fonctionnement stationnaire sur toute la plage de puissance de la chaudière 30 % à 100 % : < 1.5 humide
- Recirculation des gaz d'échappement et utilisation optimale de la chaudière à bois requises (heures de fonctionnement à pleine charge > 3'000 h/a, peu de phases de démarrage et d'arrêt).
- Teneur moyenne en eau du combustible au moins M40
- Gradient de l'échangeur de chaleur entre la température des gaz d'échappement à la sortie et la température de retour du système de chauffage < 4 K dans le cas d'une conception avec une puissance maximale de récupération de chaleur et < 2 K sur toute la durée de fonctionnement.

La **température de retour** détermine le taux de récupération de chaleur. **Chaque kelvin** de refroidissement des gaz d'échappement en dessous du point de rosée **augmente** le taux de récupération de chaleur **de 1 %.**

Tableau 13.7 Exigences de base pour le fonctionnement efficace d'une installation de condensation des gaz d'échappement.

| Teneur moyenne en eau | Gamme de combustibles | Température de retour |
|---|---|---|
| M 40 | Plaquettes de bois issus de résidus forestiers | < 45 °C |
| M 40 | Plaquettes de bois issus de résidus forestiers (> 1'000 kW de puissance thermique nominale de la chaudière) | < 50 °C* |
| M 50 | Résidus de bois industriels provenant d'une scierie | < 50 °C |

* avec humidification de l'air de combustion

Dans la version de base, l'installation de condensation des gaz d'échappement est intégrée hydrauliquement en série dans le retour principal (voir Figure 13.2). Afin de garantir la température de retour la plus basse possible, le débit volumique pour la condensation doit être prélevé avant l'accumulateur. En raison de la simultanéité de la chaudière et de la condensation, le fonctionnement du système hydraulique peut ainsi être garanti sans débordement.

Il est également possible d'intégrer la condensation dans le retour principal entre l'accumulateur et la chaudière (voir Figure 13.3). En cas de faible débit dans le retour principal, le débit dans le circuit de l'installation de condensation des gaz d'échappement doit être réduit en diminuant la puissance de la pompe, de manière à exclure tout débordement de l'alimentation de l'installation de condensation des gaz d'échappement à l'entrée de celle-ci. L'installation d'un clapet anti-retour ou d'un clapet anti-retour à battant constitue une mesure supplémentaire pour empêcher tout débordement indésirable.

Dans des cas exceptionnels, par exemple en cas de séparation du réseau entre la production de chaleur et le réseau de chaleur ou dans le cas d'une conduite avec des températures de retour basses, la condensation des gaz d'échappement peut être intégrée dans le retour côté réseau (voir Figure 13.4). Dans ce cas, il faut tenir compte de la simultanéité de la production de chaleur de l'installation de condensation des gaz d'échappement et des besoins en chaleur du réseau, ainsi que des débits massiques correspondants dans le retour.

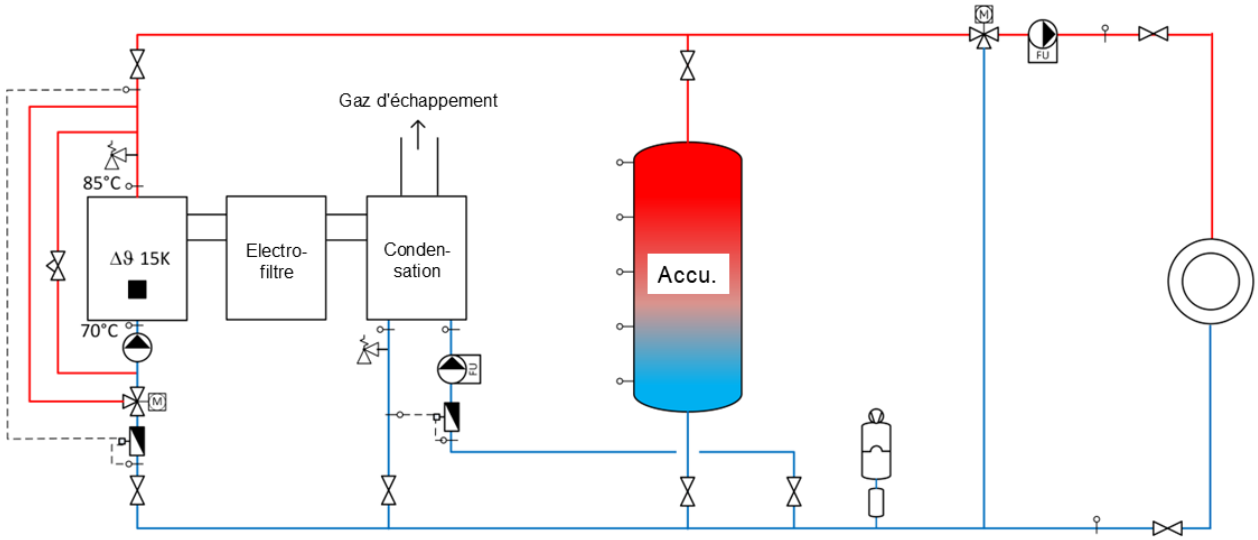



Figure 13.2 Schéma de principe d'une installation avec intégration de la condensation des gaz d'échappement dans le retour principal: entrée de la condensation avant l'accumulateur, sortie de la condensation entre le ballon et la chaudière.

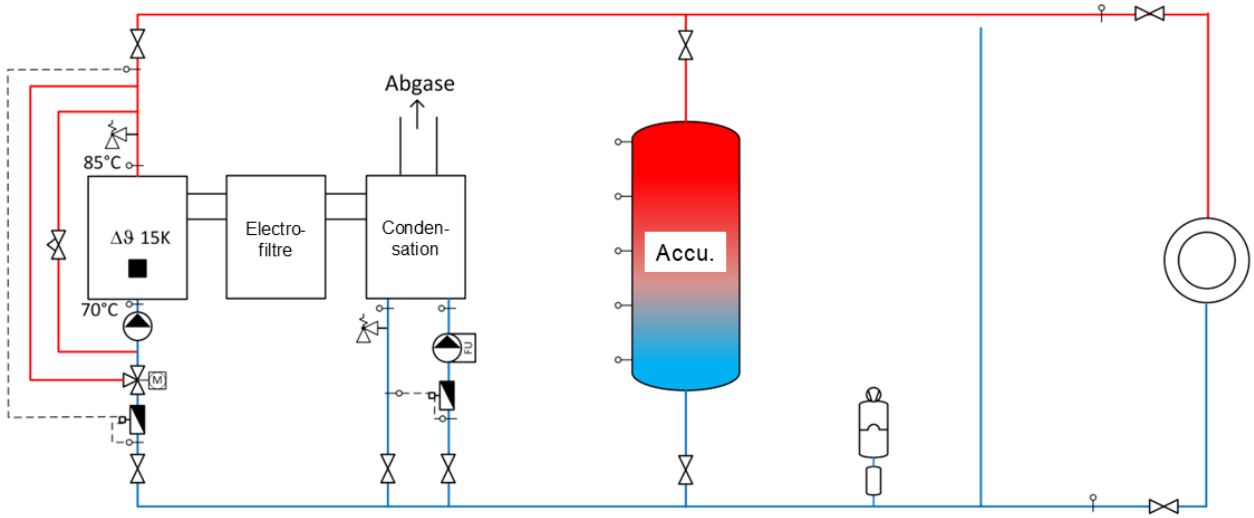



Figure 13.3 Schéma de principe d'une installation avec intégration de la condensation des gaz d'échappement dans le retour principal: entrée et sortie de la condensation entre l'accumulateur et la chaudière.

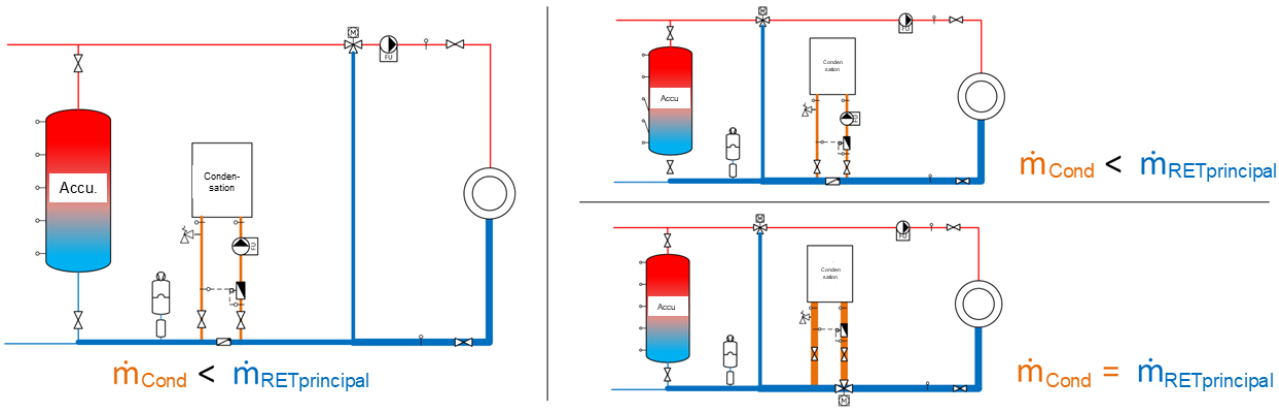



Figure 13.4 Schéma de principe avec intégration de la condensation dans le retour principal avant l'accumulateur.

#### 13.7.2.4 Récupération de chaleur avec condensation des gaz d'échappement pour un réseau à basse température

Si les consommateurs de chaleur peuvent être raccordés à un réseau basse température séparé avec des températures de retour basses et des exigences de température également basses, l'alimentation du réseau basse température peut être assurée uniquement par la chaleur résiduelle issue de la condensation des gaz d'échappement (Figure 13.). Le faible niveau de température permet d'obtenir un rendement thermique nettement plus élevé à partir de la condensation des gaz d'échappement.

**Remarque**: pour couvrir les pics de consommation ou pour des raisons d'hygiène, il peut être nécessaire d'augmenter temporairement les températures du réseau à l'aide de la chaleur provenant de l'installation primaire. En raison de la température nettement plus basse des gaz d'échappement en fonctionnement normal et de la nouvelle augmentation de la température des gaz d'échappement en cas de dysfonctionnement de la condensation des gaz d'échappement, il convient d'accorder une attention particulière au dimensionnement de la section transversale de la cheminée (voir chapitre 13.10.4.2) et au mode de fonctionnement en cas de dysfonctionnement.

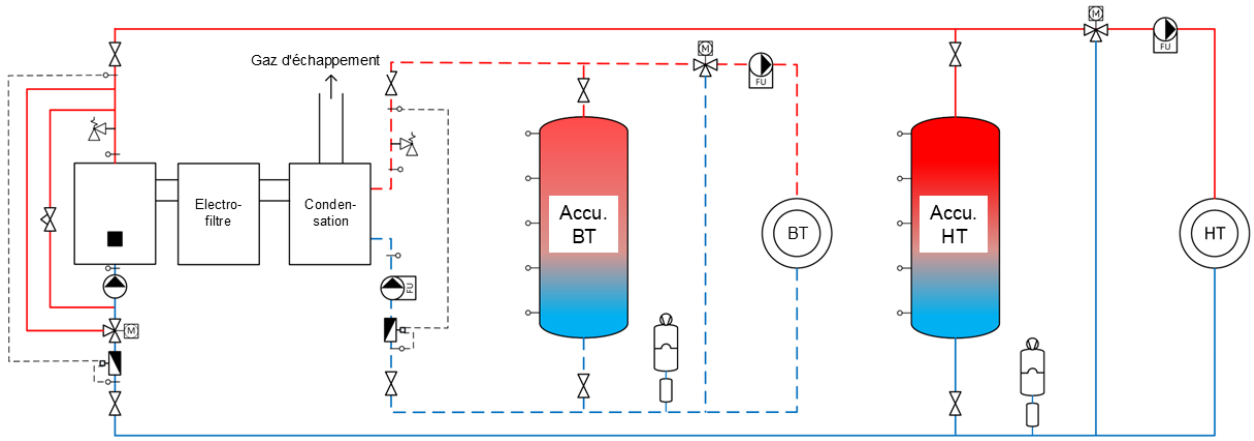



Figure 13.20 Schéma de principe Intégration de la condensation des gaz d'échappement dans un réseau à basse température.

## 13.7.3 Pompes à chaleur

### 13.7.3.1 Informations générales

Une pompe à chaleur extrait la chaleur d'une source à basse température afin de l'élever à une température plus élevée. La chaleur à température plus élevée peut être utilisée à des fins de chauffage. Le principe de fonctionnement du cycle de la pompe à chaleur ainsi que la définition des indices correspondants sont supposés connus.

**L'efficacité** d'une installation de pompe à chaleur est définie par le coefficient de performance **COP** (coefficient of performance) et le coefficient de performance annuel **COPA**.

Le **degré de qualité** indique dans quelle mesure le coefficient de performance COP de la machine réelle s'écarte du coefficient de performance COP du cycle de Carnot idéal.

Les exigences de base pour une installation de pompe à chaleur sont les suivantes :

- Le fluide frigorigène (agent de travail) de la pompe à chaleur doit présenter une compatibilité environnementale élevée en termes d'appauvrissement de la couche d'ozone (ODP, « Ozone Depletion Potenial ») et d'effet de serre (GWP, « Global Warming Potential »).
- Le fluide frigorigène doit être adapté à toute la plage de température d'utilisation.
- La conception de la pompe à chaleur doit correspondre à la charge de travail de l'appareil. Une pompe à chaleur fonctionnant 8'000 heures par an à pleine puissance doit être réalisée selon les normes industrielles.
- Les exigences légales relatives à la construction d'une installation de pompe à chaleur doivent être respectées. Toutes les normes et directives pertinentes doivent être respectées (réfrigérants autorisés, émissions sonores, risques potentiels, ventilation du local d'installation, alarme de gaz, etc.).

### 13.7.3.2 Efficacité énergétique d'une installation de pompe à chaleur

L'installation de pompe à chaleur doit fonctionner avec un coefficient de performance COP élevé ou un coefficient de performance annuel COPA élevé. Les points suivants doivent être pris en compte lors de la conception de l'installation :

- Fonctionnement avec la plus petite différence de température possible. La chaleur produite doit être utilisée à la température la plus basse possible. Il convient de veiller à une utilisation optimale de la chaleur résiduelle des gaz chauds en fonction de la différence de température possible.

- Choisir une pompe à chaleur avec un COP élevé ou un coefficient de performance élevé (voir la Figure 13. et la Figure 13.)
- Fonctionnement continu de l'installation au point de fonctionnement optimal avec une puissance calorifique variable et peu de phases de démarrage/arrêt afin de réduire l'usure. À cette fin, il est possible d'utiliser plusieurs pompes à chaleur, des pompes à chaleur à vitesse variable ou une combinaison des deux variantes.
- Intégration hydraulique de l'installation de pompes à chaleur pour l'augmentation de la température du retour principal:
  - La température du retour principal du réseau de chaleur doit être maintenue constante au niveau le plus bas possible.
  - L'alimentation en chaleur de l'installation de pompes à chaleur pour l'augmentation de la température de retour doit être effectuée en fonction de la différence de température la plus faible possible, en fonction de la puissance de transfert dans le débit variable du circuit de la pompe à chaleur.
  - Dans les conditions de fonctionnement suivantes, l'alimentation en chaleur de la pompe à chaleur doit s'effectuer dans un accumulateur qui est intégré en série dans le retour principal (voir la Figure 13.5 à gauche) ou dans la partie inférieure de l'accumulateur qui est intégrée en parallèle aux générateurs de chaleur (voir la Figure 13.5 à droite):
    - Le déroulement de la production de chaleur de l'installation de pompe à chaleur n'est pas identique au déroulement de la réduction de la charge dans le réseau de chaleur: pompe à chaleur à 1 étage
    - La production de chaleur de la source de chaleur (par exemple, installation de condensation des gaz d'échappement, machine frigorifique) est décalée par rapport à la consommation dans le réseau de chaleur. À court terme, des fluctuations de charge importantes peuvent survenir dans le réseau de chaleur.

      Cette intégration hydraulique permet d'obtenir une température de retour constante et basse dans le circuit de la pompe à chaleur malgré les variations de charge du réseau de chaleur par rapport à la courbe de production de chaleur de la pompe à chaleur.

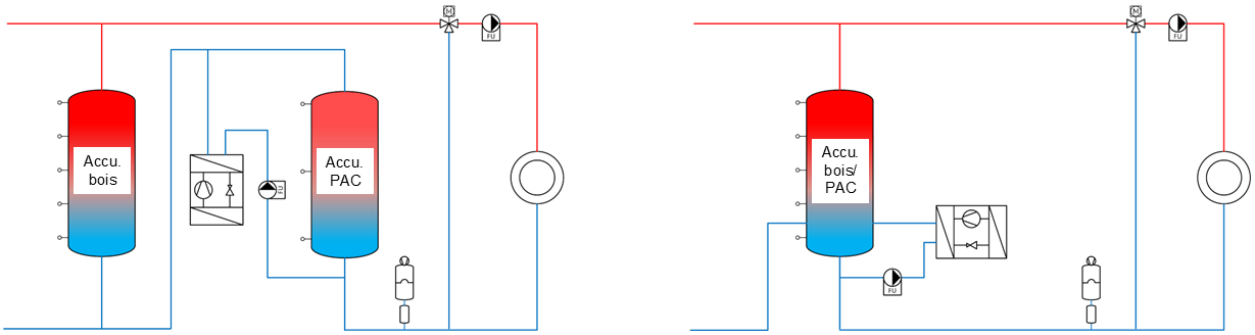



Figure 13.5 Schéma de principe pour l'intégration de pompes à chaleur.

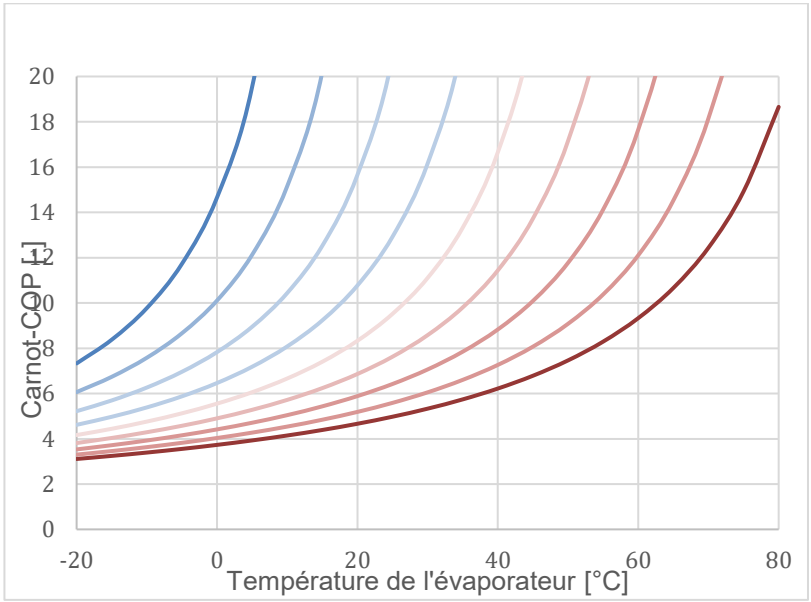



Figure 13.22 COP du cycle de Carnot. Le diagramme se base sur un coefficient de performance de 1 pour une machine ou une pompe à chaleur idéale. En fonctionnement réel, les PAC présentent un coefficient de performance compris entre 0.4 et 0.6.

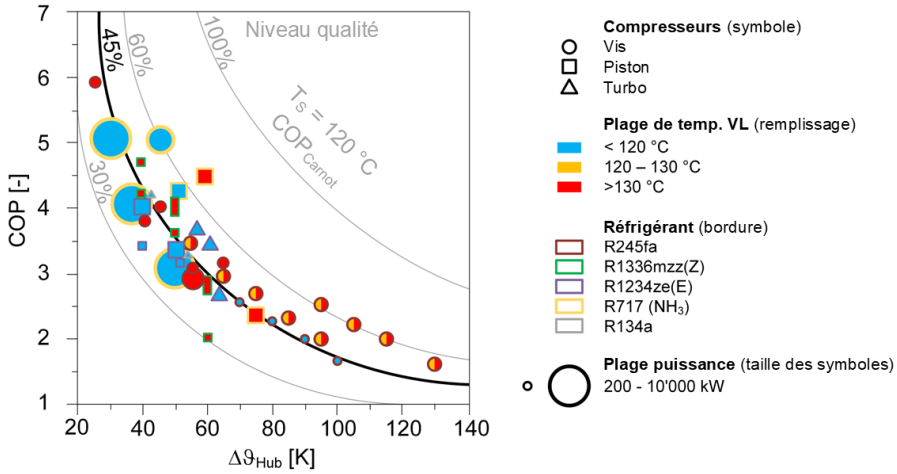



Figure 13.23 Rendement et COP de machines réelles en fonction de l'écart de température extérieure, c'est-à-dire la différence de température entre la sortie du puits et l'entrée de la source (dessiné par nos soins sur la base de [135]).

Pour un fonctionnement économique et efficace sur le plan énergétique d'une installation de pompe à chaleur pour un réseau de chaleur avec une centrale de chauffage au bois, il convient de respecter une valeur cible du **coefficient de performance annuel COPA > 4**. Le coefficient de performance annuel COPA ou le coefficient de performance COP est directement lié à la différence de température que l'installation de pompe à chaleur doit fournir (voir la Figure 13.). L'état de la technique des installations de pompes à chaleur industrielles est le suivant:

- Différence de température de 30 K, COP de 6 à 7*
- Écart de température 40 K, COP 4 à 5*
- Écart de température 60 K, COP 3 à 4*
  (p. ex. 15 °C à 75 °C)

  *Pompes à chaleur à haut rendement

Lors du choix du **fluide frigorigène**, il convient de veiller à ce que son ODP soit égal à 0 et son GWP faible (voir l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques, ORRChim) [136]). Il convient d'utiliser autant que possible des fluides frigorigènes naturels.

### 13.7.3.3 Intégration hydraulique d'une pompe à chaleur pour le fonctionnement estival

Si la température de départ de la pompe à chaleur en mode été, lorsque la production de chaleur est assurée uniquement par la pompe à chaleur, correspond à la température de départ de la conduite longue distance, la pompe à chaleur alimente en chaleur le ballon de la chaudière à bois (voir la Figure 13.). En cas de fonctionnement conjoint de la pompe à chaleur et de la chaudière à bois, la chaleur de la pompe à chaleur est injectée dans le retour principal avant le ballon ou dans la partie inférieure du ballon afin d'augmenter la température de retour.

**Remarque** : les exigences de base en matière de gestion de la qualité doivent toujours être respectées !

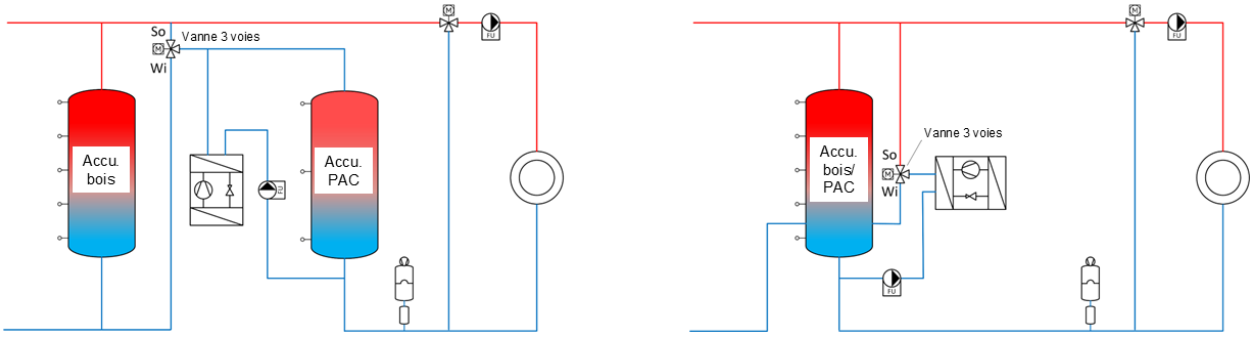



Figure 13.24 Schéma de principe pour l'intégration d'une pompe à chaleur pour le fonctionnement en été.

### 13.7.3.4 Pompe à chaleur combinée à la condensation des gaz d'échappement

La part de récupération de chaleur de la condensation des gaz d'échappement peut être augmentée jusqu'à 30 % si, après refroidissement, les gaz d'échappement sont refroidis à une température inférieure à 30 °C par rapport à la température de retour principale du réseau de chaleur.

L'installation de pompe à chaleur doit être montée hydrauliquement de manière à ce que la chaleur produite soit injectée en série dans le retour principal (voir la Figure 13.). Cela permet d'obtenir un COP élevé. Plus l'écart de température est faible, plus le COP est élevé.

Afin de maintenir la variation de température de la pompe à chaleur à un niveau faible, il convient de veiller à ce que la température du retour principal soit basse. Il faut toutefois noter que la partie directe de la récupération de chaleur par le système de condensation des gaz d'échappement entraîne déjà une augmentation du retour principal.

L'économiseur doit être intégré hydrauliquement dans le retour principal après l'augmentation de la température par l'installation de pompe à chaleur.

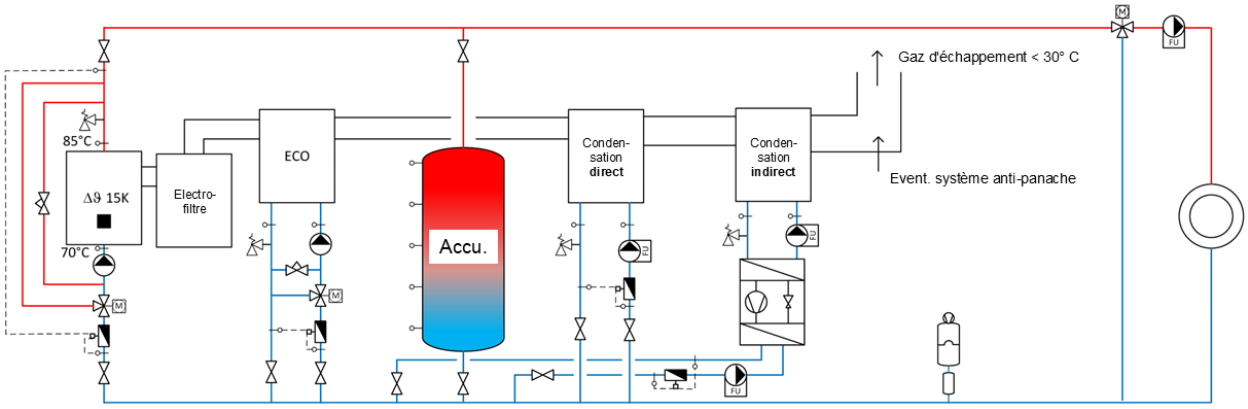



Figure 13.25 Schéma de principe de l'intégration d'une pompe à chaleur dans la condensation des gaz d'échappement.

Lors de l'utilisation de **pompes à chaleur à compression**, il convient de viser un COP > 4 et de concevoir l'installation de manière à ce qu'elle puisse fonctionner dans des conditions d'exploitation optimales constantes malgré les fluctuations du débit des gaz d'échappement, grâce à la modulation de la puissance de la chaudière. Cela peut être réalisé, par exemple, en utilisant plusieurs pompes à chaleur à compression, une pompe à chaleur à vitesse variable avec des pompes à vitesse variable pour le circuit de la source de chaleur et le circuit de chaleur utile, ou en combinant les deux options. La puissance thermique supplémentaire que le système de pompe à chaleur gagne grâce à l'utilisation du système de condensation des gaz d'échappement augmente considérablement la puissance thermique totale de la production de chaleur. Lors du choix de la pompe à chaleur, il faut veiller à ce qu'elle soit adaptée à la fois à une faible élévation de température et à une température de source relativement élevée.

**Les pompes à chaleur à absorption** fonctionnent avec une chaudière à eau chaude dans une plage de température de 150 °C. Environ 30 % de la puissance de la chaudière à bois (les chaudières à bois) est nécessaire pour alimenter la pompe à chaleur à absorption. En option, la puissance totale de la chaudière à bois peut être répartie entre 70 % de puissance de la chaudière à eau chaude et 30 % de puissance de la chaudière à eau chaude avec un système commun de condensation des gaz d'échappement. L'eau chaude (30 % du débit volumique total du circuit de la chaudière) est refroidie dans la pompe à chaleur à absorption d'environ 150 °C à environ 130 °C. Si la température de départ ou de retour pour l'augmentation de la température de retour principale est de 80 °C ou 55 °C côté condenseur et si la température des gaz de combustion après condensation est inférieure à 30 °C, on obtient un COP d'environ 1.7 (Figure 13.6).

L'efficacité énergétique peut être augmentée d'environ 20 % grâce à la condensation des gaz d'échappement lorsque la teneur en eau du combustible est de M 50. Le rendement supplémentaire de l'économiseur n'est pas pris en compte.

Les pompes à chaleur à absorption pour la récupération de chaleur avec condensation des gaz d'échappement sont utilisées dans les centrales de chauffage au bois dont la puissance thermique totale requise est supérieure à 5 MW. Idéalement, une partie des consommateurs de chaleur (max. environ 50 %) a également besoin d'eau chaude, comme c'est le cas dans les laiteries, les blanchisseries et autres consommateurs de chaleur industrielle.

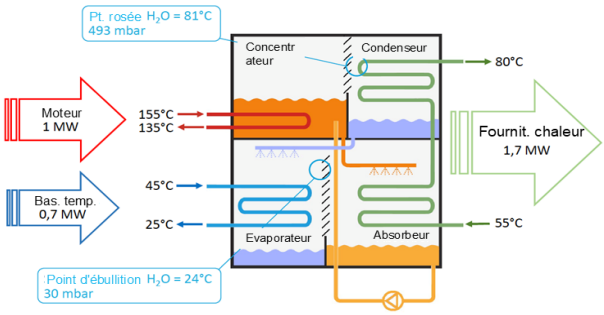



Figure 13.6 Pompe à chaleur à absorption (LiBr, à un étage; source : STEPSAHEAD).

**Les pompes à chaleur rotatives** pour la récupération de chaleur avec condensation des gaz d'échappement sont utilisées dans les centrales de chauffage au bois dont la puissance thermique totale requise est supérieure à 5 MW.

Les avantages des pompes à chaleur rotatives sont les suivants:

- Pas de réfrigérant problématique
  ODP=0, GWP=0, ininflammable, non toxique (gaz rare)
- Large domaine d'application de -20 °C à 150 °C
  avec une seule et même machine et le même fluide de travail
- Réglage très flexible des températures et des performances
- Avantages pour les applications à haute température < 100 °C.

Les inconvénients des pompes à chaleur rotatives sont les suivants:

- COP modéré
- coûts élevés
- encombrement important.

#### 13.7.3.5 Récupération de chaleur avec condensation des gaz d'échappement pour le chauffage à distance à basse température

L'injection de la chaleur de l'installation de condensation des gaz d'échappement dans un réseau avec une température de départ d'environ 15 °C permet de refroidir les gaz d'échappement à < 20 °C et d'obtenir ainsi un taux élevé de récupération de chaleur grâce à la condensation des gaz d'échappement. La chaleur est distribuée sous forme de chauffage à distance froid et portée à la température de consigne par des pompes à chaleur décentralisées (COPA > 4). Cela permet une utilisation énergétique élevée et efficace du bois énergie.

### 13.7.4 Énergie solaire

#### 13.7.4.1 Objectifs

Les objectifs de l'utilisation de l'énergie solaire en combinaison avec l'exploitation d'une centrale de chauffage au bois sont énumérés ci-dessous :

- Une utilisation directe et efficace de l'énergie solaire permet de réduire les besoins en bois-énergie pendant les mois où l'ensoleillement est élevé. Le bois-énergie doit être utilisée pendant les mois où l'ensoleillement est faible.
- Éviter le fonctionnement d'une chaudière à bois en été avec une utilisation insuffisante en période de faible charge.
- Réduire l'utilisation de combustibles fossiles (fioul, gaz) en été lorsque la charge de la chaudière à bois est insuffisante et de la chaudière à bois en période de faible consommation.

#### 13.7.4.2 Installations solaires thermiques pour les réseaux de chaleur

Une installation solaire thermique pour un réseau de chaleur est conçue sur la base de la charge estivale moyenne, c'est-à-dire la charge de chauffage journalière moyenne du réseau de chaleur en été, en tant que besoin en puissance thermique indépendant des conditions météorologiques, conformément à la Figure 13.7. L'intégration hydraulique de l'installation solaire thermique dans le réseau de chaleur peut être centrale ou décentralisée.

Avec un champ de capteurs solaires thermiques dimensionné en fonction de la charge de chauffage journalière moyenne du réseau de chaleur en été, les besoins en chaleur peuvent être couverts à 100 % en été et en partie pendant la période de transition. La chaudière à bois n'est mise en service qu'au début de la saison de chauffage.

Si la surface limitée du champ de capteurs empêche une couverture estivale à 100 %, la couverture restante nécessaire doit être assurée par une chaudière à bois de haute qualité ou, à défaut, par une chaudière fonctionnant idéalement au bio-fioul ou au biogaz (voir chapitre 13.6.2).

Vous trouverez différents exemples et possibilités d'intégration d'installations solaires sur les sites web de Solar District Heating ou Euroheat & Power (https://www.solar-district-heating.eu et https://www.euroheat.org/).

La formule empirique suivante, qui tient compte des valeurs indiquées dans le Tableau 13.1 permet d'estimer approximativement la surface totale nécessaire pour les capteurs. La conception détaillée de la surface totale des capteurs doit être réalisée en tenant compte des conditions cadres effectives. Des outils simples et gratuits facilitent le dimensionnement (par exemple www.scfw.de).

*Surface de capteurs = facteur surface de capteurs [$m^2/kW_{besoins\ estivaux}$] x charge thermique journalière moyenne besoins estivaux [$kW_{besoins\ estivaux}$]*

Tableau 13.1 Estimation de la surface de capteurs et du volume de stockage pour différents taux de couverture solaire sur la base de dix installations réalisées en Allemagne, en Autriche et en Suisse.

| **Facteur surface de capteurs** [$m^2/kW_{besoins\ estivaux}$] | **Volume de stockage** [$l/m^2_{capteur}$] | **Couverture annuelle*** [%] | **Couverture estivale** [%] |
|---|---|---|---|
| 20 | 100 | env. 20 | 100 |
| 4 | 200 | env. 6 | 40 |
| 2 | 300 | env. 3 | 20 |

*Hypothèse: besoins annuels en chaleur pour l'eau chaude sanitaire 25 % des besoins totaux en chaleur, respectivement besoins en chaleur hors période de chauffage (été) environ 10 % des besoins annuels en chaleur (besoins en chaleur pour l'eau chaude sanitaire plus pertes de chaleur sur les conduites à distance). Plus la part des besoins annuels en chaleur pour l'eau chaude sanitaire est élevée, plus la couverture annuelle potentielle est importante.

En supposant un rendement annuel des capteurs de 400 à 500 kWh/$m^{(2)}$, on obtient les ordres de grandeur suivants:

- Avec une surface de capteurs d'environ 20 m²/kW et un volume de stockage d'environ 100 litres/m²de surface de capteurs, il est possible d'atteindre un taux de couverture solaire d'environ 20 % par rapport aux besoins annuels totaux en chaleur du réseau de chaleur. En été, le taux de couverture solaire peut dans ce cas atteindre près de 100 %.
- Avec environ 4 m²/kW de surface de capteurs et un volume de stockage de 200 litres/m²de surface de capteurs, il est possible d'atteindre un taux de couverture solaire pouvant atteindre 6 % des besoins annuels totaux en chaleur du réseau de chauffage.
- Avec une surface de capteurs de 2 m²/kW et un volume de stockage de 300 litres/m²de surface de capteurs le taux de couverture solaire atteint jusqu'à 3 % des besoins annuels totaux en chaleur du réseau de chauffage.

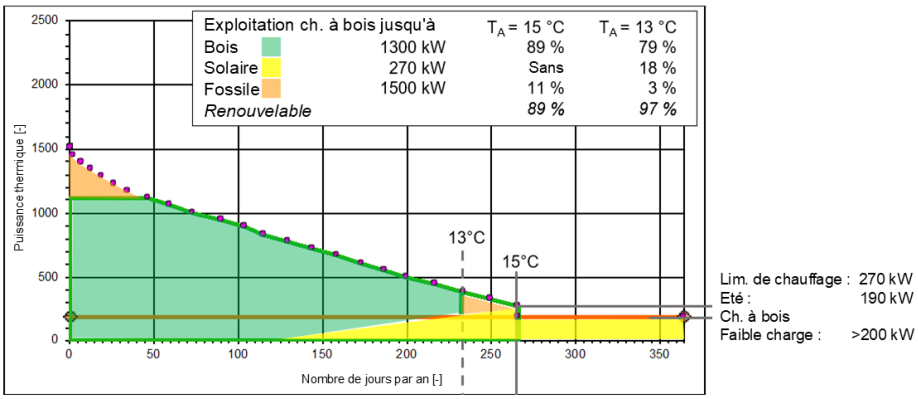



Figure 13.7 Courbe de charge annuelle d'une centrale de chauffage au bois équipée d'une chaudière à bois, d'une chaudière à combustible fossile et d'une installation solaire thermique.

Pour intégrer de manière judicieuse sur le plan énergétique une installation solaire thermique dans le réseau d'une centrale de chauffage au bois afin de réduire les besoins en énergie bois ou en combustibles fossiles, il faut que la chaudière à bois puisse fonctionner avec un rendement annuel global élevé $\eta_a$ > 90 %. Cela nécessite une utilisation optimale des chaudières à bois, associée à une récupération énergétique efficace de la chaleur contenue dans les gaz d'échappement.

- Le rendement thermique supplémentaire résultant de l'installation d'un économiseur représente environ 6 % de la production de chaleur de la chaudière à bois. Cela correspond au rendement d'une installation solaire thermique avec une surface de capteurs solaires de 4 m² par kW de charge de chauffage journalière moyenne en été et un taux de couverture solaire annuel pouvant atteindre 6 %.
- Le rendement thermique supplémentaire résultant de l'installation d'un système de condensation des gaz d'échappement représente environ 15 à 20 % de la production de chaleur de la chaudière à bois. Cela correspond au rendement d'une installation solaire thermique avec une surface de capteurs solaires de 20 m² par kW de charge de chauffage journalière moyenne en été et un taux de couverture solaire pouvant atteindre 20 %.

**Remarque** : si l'installation solaire thermique ne peut pas couvrir la totalité des besoins estivaux, l'utilisation de la chaudière à bois en service est considérablement limitée par le rendement thermique de l'installation solaire thermique. Si l'utilisation est nettement inférieure à la charge de chauffage journalière moyenne minimale requise pour la chaudière à bois selon le Tableau 13.4, cela entraîne une forte réduction du rendement annuel $\eta_a$ de la chaudière à bois en service. Dans ces circonstances, la combinaison d'une installation solaire thermique et d'une chaudière à bois pour couvrir les besoins en chaleur en été peut avoir un effet défavorable sur l'efficacité énergétique.

**L'utilisation de la chaudière à bois** est également considérablement réduite pendant la période de transition en raison du rendement thermique de l'installation solaire thermique. Cette problématique est illustrée dans la courbe annuelle de la Figure 13.7. Avec un taux de couverture solaire de près de 100 % en été (p. ex. substitution des énergies fossiles en été), le rendement thermique de l'installation solaire thermique réduit considérablement la charge de la chaudière à bois pendant la période de transition. Avec le choix du système « une chaudière à bois avec accumulateur (monovalent ou bivalent) », le fonctionnement de la chaudière à bois pendant la période de transition est défavorable, avec un rendement annuel $\eta_a$ réduit en raison d'une utilisation insuffisante, qui est nettement inférieure à la charge de chauffage quotidienne minimale moyenne requise pour la chaudière à bois.

Une chaudière à bois supplémentaire de faible puissance fonctionnant avec un combustible de haute qualité (par exemple des granulés ou des plaquettes de bois de qualité) en été et éventuellement pendant la période de transition permet d'éviter le problème de la charge insuffisante de la chaudière à bois grâce au rendement thermique de l'installation solaire thermique (voir chapitre 13.6.2).

Par conséquent, pour un fonctionnement optimal de l'installation de chauffage au bois pendant la période de transition avec la charge requise et le rendement thermique supplémentaire de l'installation solaire thermique, les variantes suivantes doivent être envisagées : 2 chaudières à bois (répartition de la puissance des chaudières 1 pour 2) ou installation à plusieurs chaudières avec accumulateur.

Le volume de stockage commun doit être utilisé comme suit:

- En été, le rendement thermique de l'installation solaire thermique et la production de chaleur de l'installation à chaudière à bois sont injectés dans le circuit principal.
- Pendant la période de transition, le rendement thermique de l'installation solaire thermique est injecté dans le tiers inférieur du ballon afin d'augmenter le retour principal. Les deux tiers supérieurs du ballon sont gérés par l'installation à chaudières à bois conformément au schéma standard QM Chauffages au bois.
- Des informations complémentaires sont disponibles dans la FAQ 32 « Comment intégrer des capteurs solaires ? ».

#### 13.7.4.3 Installation solaire thermique décentralisée chez le consommateur de chaleur

Lorsque la densité de raccordement au réseau de chaleur est inférieure à 1 MWh/(a*m), il convient de vérifier si la production d'eau chaude sanitaire peut être assurée de manière décentralisée en été chez les consommateurs de chaleur à l'aide d'installations de capteurs solaires thermiques, car pendant cette période, les pertes de chaleur du réseau de chaleur sont nettement supérieures aux besoins en chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire.

Dans cette variante, le réseau de chaleur n'est exploité que pendant la période de chauffage. Les pertes thermiques du réseau de chaleur en été sont supprimées et ne doivent pas être compensées par une installation solaire thermique centrale avec la consommation d'électricité correspondante pour les pompes de l'installation solaire thermique et du réseau de chaleur.

La conception de l'installation solaire thermique est adaptée à la consommation d'eau chaude de chaque consommateur de chaleur. En été, la production d'eau chaude chez le client serait également possible avec une pompe à chaleur (chaudière à pompe à chaleur combinée à une installation photovoltaïque).

#### 13.7.4.4 Photovoltaïque avec pompe à chaleur

Les besoins en chaleur d'un réseau de chaleur peuvent être entièrement couverts par une pompe à chaleur en été. Si l'électricité pour la pompe à chaleur est produite par une installation photovoltaïque (installation PV), cette production de chaleur est également renouvelable. La pompe à chaleur peut également être intégrée en hiver pour couvrir les pics de consommation ou dans la condensation des gaz d'échappement.

Une surface totale de modules photovoltaïques de 5 à 7 $m^2$ par kW de charge de chauffage journalière moyenne en été permet d'obtenir une production d'électricité annuelle qui correspond à la consommation électrique de la pompe à chaleur pour couvrir les besoins en chaleur en été.

La surface des modules photovoltaïques peut également être répartie sur plusieurs toitures existantes.

Les hypothèses suivantes peuvent être formulées:

- Besoins en chaleur en été: 10 % des besoins annuels totaux en chaleur
- Source de chaleur : air extérieur en moyenne > 15 °C, température de départ du réseau de chaleur 70 °C
- Coefficient de performance annuel (COPA) de la pompe à chaleur > 3 (jusqu'à 4 pour une pompe à chaleur à haut rendement).

Contrairement à l'énergie solaire thermique, la pompe à chaleur peut être désactivée au début de la période de transition afin de mettre en service la chaudière à bois. La chaudière à bois peut ainsi fonctionner pendant la période de transition avec la charge requise et sans perte du rendement annuel (voir chapitre 13.7.4.2). L'électricité photovoltaïque non utilisée directement peut être injectée dans le réseau.

Dans le cas du système « chaudière à bois avec accumulateur monovalent », la pompe à chaleur doit être dimensionnée plus largement. La mise en marche et l'arrêt de la pompe à chaleur permettent de moduler plus souplement l'utilisation indirecte de l'énergie solaire avec l'installation photovoltaïque, en tenant compte de la charge de travail requise de la chaudière à bois. L'utilisation de l'énergie solaire et la production de chaleur sont séparées dans le temps.

La pompe à chaleur peut également être utilisée pour la récupération de chaleur avec condensation des gaz d'échappement.

### 13.7.5 Récupération de chaleur

#### 13.7.5.1 Remarques préliminaires

On appelle chaleur fatale (chaleur résiduelle) les flux thermiques qui sont générés comme sous-produits de processus et qui sont rejetés dans l'environnement sans être utilisés, souvent avec une consommation d'énergie supplémentaire pour les pompes, les ventilateurs, les refroidisseurs ou les installations frigorifiques, contribuant ainsi à un réchauffement indésirable. On entend par utilisation de la chaleur fatale (récupération de chaleur) les mesures qui utilisent cette chaleur fatale pour d'autres processus ou à d'autres fins, augmentant ainsi l'efficacité énergétique.

Contrairement à la chaleur produite par un générateur de chaleur, la chaleur fatale n'est pas générée en fonction des besoins, mais en fonction des processus. Les fluctuations qualitatives (température) et quantitatives (quantité de chaleur) de l'offre de chaleur fatale dues aux conditions saisonnières, aux horaires de travail ou aux processus et à d'autres raisons, ainsi que les décalages temporels entre l'offre de chaleur fatale et les besoins en chaleur doivent être pris en compte lors de la conception des installations et en particulier des accumulateurs de chaleur. Dans le tableau Excel « Relevé de situation » du QM Chauffages au bois » (Analyse de la situation des centrales de chauffage au bois), l'utilisation de la chaleur fatale peut être prise en compte dans la conception de l'installation sous « Performance journalière moyenne maximale de la source de puissance de base ».

**Remarque**: les entreprises industrielles travaillent généralement en une ou deux équipes du lundi au vendredi et ne produisent pas pendant la période de Noël et du Nouvel An. Il se peut donc que la chaleur résiduelle des entreprises industrielles ne soit pas disponible pour le chauffage des locaux pendant cette période.

### 13.7.5.2 Utilisation directe de la chaleur résiduelle (fatale)

**Sources de chaleur résiduelle > 80 °C**

La chaleur provenant de sources de chaleur résiduelle > 80 °C (par exemple, chaleur résiduelle des installations de cogénération, géothermie profonde) se situe généralement au même niveau de température que le chauffage au bois et peut être intégrée directement dans le circuit principal ou dans l'accumulateur de chaleur, parallèlement à la chaudière à bois.

Lors de l'intégration de sources de chaleur résiduelle de puissance relativement faible et donc de faible débit massique, il convient de veiller à ce que le débit des consommateurs de chaleur soit adapté à ce débit massique. Sinon, il existe un risque que la température dans le départ de l'utilisation de la chaleur résiduelle soit mélangée en raison du débit massique élevé et que l'accumulateur thermique soit chargé par le bas.

**Sources de chaleur résiduelle > 60 °C**

Pour les sources de chaleur > 60 °C (chaleur industrielle fatale, chaleur fatale de l'air comprimé, chaleur de désurchauffage ou géothermie moyenne), la chaleur doit être injectée directement dans le retour principal du réseau de chaleur. Cela permet d'augmenter la température du retour principal et de réduire la quantité de chaleur > 80 °C à ajouter pour atteindre la valeur de consigne du réseau de chaleur. Dans ce cas, il convient toutefois de comparer la simultanéité de la production de chaleur résiduelle et des besoins en chaleur résiduelle des clients ou du réseau de chaleur, ainsi que les flux massiques du retour principal à augmenter avec la puissance de chaleur résiduelle. Le cas échéant, un accumulateur de chaleur supplémentaire peut s'avérer utile pour compenser le décalage temporel entre la production de chaleur et les besoins en chaleur. Si cette chaleur résiduelle est directement injectée dans l'accumulateur thermique de l'installation de chauffage au bois, la quantité de chaleur correspondante et son influence sur la température de l'accumulateur doivent être prises en compte lors de la conception de l'accumulateur thermique. L'accumulateur d'énergie doit être dimensionné en conséquence et il faut s'assurer que la température de retour maximale de tous les composants de la production de chaleur peut être respectée.

### 13.7.5.3 Utilisation indirecte de la chaleur fatale avec une pompe à chaleur

**Sources de chaleur résiduelle < 50 °C**

La chaleur fatale provenant de sources de chaleur dont la température est inférieure à la température de retour principale des consommateurs de chaleur ne peut pas être utilisée directement. S'il n'existe pas de dissipateur thermique pour l'utilisation directe de la chaleur résiduelle, celle-ci peut être portée à un niveau de température utilisable à l'aide d'une pompe à chaleur et injectée dans le circuit de chauffage.

En ce qui concerne les possibilités d'application, les limites d'utilisation et les exigences relatives à la conception des pompes à chaleur, il convient de respecter les conditions de base énoncées au chapitre 13.7.3.

Les sources de chaleur supplémentaires suivantes, en plus de la chaleur de condensation provenant des gaz d'échappement, peuvent par exemple être utilisées avec une pompe à chaleur :

- Chaleur fatale des installations frigorifiques
- Chaleur industrielle fatale / air vicié industriel
- Chaleur fatale des STEP (stations d'épuration des eaux usées)
- Eaux souterraines (eau de lac ou de rivière)
- Géothermie proche de la surface (sondes géothermiques).

**Chaleur fatale des installations frigorifiques (20 à 40 °C)**
La température de condensation des installations frigorifiques se situe généralement entre 30 °C et 40 °C. Ce niveau de température ne peut souvent pas être utilisé directement dans le réseau de chaleur, mais comme source pour une pompe à chaleur. En fonction du réfrigérant et de la conception de l'installation, le réfrigérant peut être comprimé directement à une pression plus élevée dans une deuxième étape ou porté à la température utile à l'aide d'une installation séparée.

Selon l'utilisation prévue de l'application frigorifique, la production de chaleur varie selon les saisons. Si la climatisation est principalement utilisée, la pompe à chaleur peut être utilisée pour couvrir les besoins en eau chaude en été. En hiver, le système de condensation des gaz d'échappement du chauffage au bois peut être utilisé comme source pour la pompe à chaleur. Les applications de refroidissement qui fonctionnent de manière relativement stable tout au long de l'année peuvent donc également être utilisées toute l'année pour la récupération de chaleur.

En raison de la température de source relativement élevée, ces installations permettent d'obtenir de bons coefficients de performance (COP) et/ou des températures utiles élevées.

**Chaleur industrielle résiduelle liée aux processus (5 à 80 °C)**
La chaleur fatale des installations industrielles peut avoir des origines très diverses et atteindre différents niveaux de température. La priorité absolue dans l'utilisation de la chaleur résiduelle industrielle doit toujours être donnée à l'utilisation directe, aussi près que possible du producteur. Une analyse de tous les processus de l'entreprise selon la méthode Pinch permet d'identifier les sources et les puits de chaleur et de créer un « réseau d'échangeurs de chaleur ». La chaleur résiduelle qui n'est pas utilisée dans l'entreprise peut être transmise à la centrale de chauffage.

En raison de la température, la chaleur directement utilisable doit être intégrée conformément au chapitre 13.7.5.2. La chaleur résiduelle à un niveau de température plus bas peut être portée à une température utilisable à l'aide d'une pompe à chaleur et intégrée dans l'installation:

- Dans un réseau à basse température, la chaleur résiduelle des machines (turbines avec générateur, machines-outils, etc.), la chaleur résiduelle industrielle ou commerciale et la géothermie, par exemple provenant de sources thermales, peuvent être transférées.
- L'utilisation de la pompe à chaleur doit être coordonnée avec le moment où la chaleur résiduelle est produite ou compensée par un accumulateur de chaleur.

**Chaleur fatale des stations d'épuration des eaux usées (5 à 20 °C, variable selon les saisons)**
Les stations d'épuration des eaux usées (STEP) produisent toute l'année une chaleur résiduelle de 5 °C à 20 °C qui peut être utilisée de manière judicieuse pour la condensation des gaz d'échappement des chaudières à bois. Une température de départ de la STEP d'environ 15 °C permet de refroidir les gaz d'échappement à < 20 °C et d'obtenir ainsi un taux de récupération de chaleur élevé. Pendant les mois d'hiver, le potentiel de chaleur résiduelle réduit de la STEP en raison de la diminution des quantités d'eaux usées peut être compensé par des températures d'eaux usées plus basses.

L'installation de pompe à chaleur est exploitée comme installation à charge continue pour couvrir la charge de base. En été, la pompe à chaleur fournit la température de départ de la conduite longue distance. Pendant la période de chauffage, elle sert à augmenter la température de retour principale.

La chaudière à bois sert à couvrir la charge moyenne et, si le volume de stockage est suffisant, également la charge de pointe. La charge de pointe peut également être couverte par des chaudières au biogaz ou au biofioul.

**Eaux souterraines et eaux de surface avec des températures variables selon les saisons**
Cela comprend les sources suivantes:

- La température à la source de l'eau souterraine est comprise entre 8 et 12 °C.
- La température à la source des eaux de surface est comprise entre 5 et 20 °C. Il existe des différences saisonnières relativement importantes.

Ces sources de chaleur peuvent être utilisées de manière judicieuse dans le système de condensation des gaz d'échappement de la chaudière à bois. Une température de départ de 15 °C permet de refroidir les gaz d'échappement à moins de 20 °C et d'obtenir ainsi un taux élevé de récupération de chaleur. Le potentiel réduit des eaux souterraines et de surface pendant les mois d'hiver peut être compensé par des températures d'eau plus basses.

L'installation de pompes à chaleur est exploitée comme installation à charge continue pour couvrir la charge de base. En été, elle fournit la température de départ de la conduite longue distance. Pendant la période de chauffage, elle sert à augmenter la température de retour principale.

La chaudière à bois sert à couvrir la charge moyenne et, si le volume de stockage est suffisant, également la charge de pointe. La charge de pointe peut également être couverte par des chaudières au biogaz ou au biofioul.

**Air extérieur (- 10 °C à + 30 °C)**
Le fonctionnement estival de la pompe à chaleur peut être assuré avec de l'air extérieur à une température comprise entre 10 °C et 30 °C comme source de chaleur.

Les pompes à chaleur à puissance thermique élevée nécessitent des évaporateurs d'une puissance correspondante, qui prennent beaucoup de place. De plus, il faut tenir compte de l'insonorisation, surtout en mode été.

## 13.8 Fourniture de chaleur industrielle

La chaleur industrielle désigne la chaleur nécessaire à un processus industriel. Contrairement aux besoins en chauffage des locaux, les besoins en chaleur industrielle ne dépendent généralement pas de la température extérieure, mais directement du processus à alimenter.

En raison des températures élevées de la combustion, les chaudières à bois conviennent également à la fourniture de chaleur industrielle à haute température. En fonction du niveau de température requis, la production de chaleur industrielle à partir du bois peut être utilisée pour les fluides suivants :

- Système d'eau chaude < 110 °C
- Système d'eau chaude > 110 °C
- Vapeur
- Huile thermique
- Processus à air chaud ou autres gaz chauds

Les chaudières à bois pour la vapeur, l'huile thermique ou l'air chaud sont à la pointe de la technologie et disponibles (voir également le chapitre 5.4), mais contrairement aux chaudières à eau chaude et à eau surchauffée, elles ne sont utilisées que pour les installations de cogénération ou de chaleur industrielle. Contrairement aux gaz d'échappement des chaudières à gaz, les gaz d'échappement chauds des chaudières à bois ne peuvent généralement pas être utilisés directement pour des processus (par exemple le séchage) en raison de leur teneur en poussières. Dans les applications à haute température, il convient de prêter une attention particulière à la technique de sécurité, à l'inertie due à la masse thermique importante des chauffages au bois et à la question de la corrosion. Le présent manuel de planification n'aborde pas en détail les types de construction, les installations et la technique de sécurité. Il convient dans tous les cas de faire appel à des fabricants spécialisés et à des planificateurs expérimentés dans ce domaine.

**Profil de charge et stockage**
Les besoins en chaleur industrielle, qui se présentent sous forme de charge en bande, peuvent être facilement couverts par une installation de chauffage au bois, même si le niveau de température est élevé.
Les besoins en chaleur industrielle avec des fluctuations de charge importantes à court terme et un profil de charge journalier irrégulier (par exemple, pas de consommation de chaleur en dehors des heures de travail, comme la nuit et le week-end) peuvent difficilement être couverts de manière monovalente par une installation de chauffage au bois tout

en respectant la charge requise. Afin de permettre l'équilibrage de charge nécessaire via un accumulateur de chaleur et de renoncer aux chaudières à combustibles fossiles, il convient de tenir compte des points suivants :

- Il convient tout d'abord d'examiner et d'exploiter les mesures permettant de réduire autant que possible les pics de charge en adaptant la production.
- L'accumulateur thermique et la gestion de la charge de l'accumulateur doivent ensuite être conçus de manière à ce que les pics de charge les plus importants, qui surviennent par exemple le matin en début de semaine, puissent être couverts de manière fiable par l'accumulateur et l'installation de chauffage au bois. La puissance maximale de décharge de l'accumulateur et la puissance thermique maximale de la chaudière à bois constituent ici des limites. Il faut tenir compte du fait que seules une planification prévisionnelle du fonctionnement de l'installation permet d'utiliser simultanément les deux puissances maximales, car la chaudière à bois nécessite un certain temps de démarrage et le réservoir ne peut fournir sa puissance de décharge maximale que pendant une durée limitée.
- La planification de la production doit, le cas échéant, être intégrée dans la gestion du stockage.
- En cas de besoins thermiques (de processus) réduits le week-end, la conception du stockage doit garantir la production de chaleur de la chaudière à bois à puissance minimale (selon les conditions de faible charge du Tableau 13.4). Le niveau de charge élevé du stockage le lundi matin peut être utilisé pour le pic de démarrage.
- Lorsque la vapeur, l'huile thermique ou l'air sont utilisés comme fluides caloporteurs, les possibilités de stockage sont fortement limitées en raison de divers facteurs (capacité de stockage réalisable, coûts, aspects de sécurité, etc.). En règle générale, aucune capacité de stockage ou seulement des capacités minimes peuvent être mises en œuvre pour ces fluides caloporteurs.

**Conception**
Le tableau Excel « Relevé de situation » (Analyse de la situation) de QM Chauffages au bois n'est parfois pas suffisant pour choisir et concevoir le système de production de chaleur destiné à alimenter les installations de chaleur industrielle. Des profils de charge horaires basés sur des mesures sont souvent nécessaires. L'influence des conditions météorologiques est souvent secondaire, de sorte que la conception peut être basée sur quelques profils hebdomadaires typiques sélectionnés. De plus, les exigences de température des processus sont déterminantes pour le choix de l'installation.

Variantes de système possibles :

- Couverture de la charge de base (si disponible) par une installation de combustion du bois avec accumulateur de chaleur et couverture de la charge de pointe par une chaudière à gaz fossile qui fonctionnera à l'avenir avec du biogaz provenant du réseau de gaz et présentant la qualité du gaz naturel.
- Installation de gazéification du bois produisant un gaz de bois combustible utilisé comme substitut au gaz naturel dans une chaudière à gaz. Il convient de noter que le pouvoir calorifique est nettement inférieur à celui du gaz naturel et que des adaptations des conduites de gaz et des brûleurs sont donc nécessaires. À ce jour, il n'existe pratiquement aucune expérience pratique dans ce domaine. Parallèlement, l'utilisation pour l'approvisionnement en chaleur industrielle nécessite soit un fonctionnement modulable pratiquement entre 0 % et 100 %, soit un stockage de gaz. Il n'existe encore pratiquement aucun produit commercial disponible pour cette variante et il faut s'attendre à des coûts d'investissement et d'exploitation élevés (combustible de haute qualité, frais d'entretien et de réparation accrus). Par ailleurs, les installations de gazéification du bois permettent une production supplémentaire de charbon de bois ou de « charbon végétal » (le charbon végétal est un charbon produit à partir de biomasse qui n'est pas utilisé à des fins énergétiques, mais comme matière première).

## 13.9 Conception des composants de l'installation

### 13.9.1 Sélection du système de dépoussiérage

**Procédure de sélection du procédé de séparation**

1. Examiner les possibilités de réduire la teneur en poussières dès le stade des gaz bruts (mesures primaires, voir chapitre 5.7) : choix du combustible, conception du système de combustion, réglage des paramètres de régulation.
2. Détermination du degré de séparation nécessaire pour respecter les exigences en matière d'émissions
3. Sélection du procédé de séparation approprié pour les cendres volantes et les particules fines.

**Fractions de poussière**
Du point de vue environnemental, les émissions de poussières issues de la combustion du bois revêtent une grande importance, au même titre que les émissions de $NO_x$. Pour évaluer les émissions de poussières provenant des installations de chauffage au bois, il convient en principe de distinguer deux fractions. **Les cendres volantes grossières** sont composées de particules de cendres qui sont soulevées du lit de combustion pendant la combustion et évacuées avec les gaz d'échappement. La taille de ces particules varie entre quelques µm et environ 100 µm. La deuxième fraction est constituée de **particules fines**, appelées aérosols, dont le diamètre est nettement inférieur à 1 µm et qui sont issues de la condensation de substances inorganiques présentes dans le bois et qui s'évaporent lors de la combustion.

**Exigences légales**
Dans le débat sur les poussières fines, on parle souvent de PM 10. PM 10 signifie « particulate matter < 10 µm » et correspond à la masse totale des particules solides et liquides, appelées aérosols, dont la taille est inférieure à 10 µm. La plupart des pays européens ont fixé des valeurs limites d'émission et d'immission pour les PM 10. Étant donné que les valeurs limites pour les poussières

fines respirables sont atteintes ou dépassées dans de nombreux endroits, les installations de chauffage au bois doivent également contribuer à leur réduction. Outre la masse des particules, leur nombre, plus pertinent pour la santé, pourrait également devenir un facteur important à l'avenir.

Les valeurs limites pour les poussières totales dans les installations de chauffage au bois sont spécifiques à chaque pays (voir le Tableau 13. et chapitre 19). La directive MCP de 2015 a fixé de nouvelles normes minimales d'émission au sein de l'UE pour les installations de combustion jusqu'à 50 MW thermiques en ce qui concerne les poussières, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et le dioxyde de soufre, qui ont été mises en œuvre de manière spécifique à chaque pays. L'Allemagne p. ex. a mis en œuvre la MCPD de manière beaucoup plus stricte dans la 44ème BImSchV.

Des valeurs limites nettement plus strictes s'appliquent aux autres combustibles issus de la biomasse (paille, bois usagé).

Tableau 13.9 Valeurs limites d'émission de particules fines spécifiques à chaque pays en fonction de la puissance calorifique du combustible ou de la combustion ; pour faciliter la comparaison, les valeurs limites des différents pays ont été converties à 11 et 13 % $O_2$.

| Puissance calorifique du combustible | | Poussières totales [mg/m³ ] à 11 % $O_2$ | à 13 % $O_2$ |
|---|---|---|---|
| CH | 70 - 500 kW | | 50 |
| | 0,5 - 1 MW | | 20 |
| | 1 à 10 MW | 20 | |
| | > 10 MW | 10 | |
| DE | < 1 MW | 25 | 20 |
| | 1 à 5 MW | 23 | 19 |
| | > 5 MW | 13 | 11 |
| AT | < 1 MW | 150 | 120 |
| | 1 - 2 MW | 33 | 27 |
| | > 2 MW | 20 | 16 |

**Procédés de dépoussiérage**

Les procédés suivants de dépoussiérage, décrits en détail au chapitre 5.8.1, sont disponibles :

- Dépoussiérage par gravité (chambres de décantation)
- Séparation par force centrifuge (cyclone, multicyclone)
- Forces électriques (électrofiltres, électrofiltres humides)
- Filtration (filtres en tissu, filtres à lit fluidisé, filtres en céramique)
- Dépoussiérage humide (laveurs Venturi, laveurs à flux radial, condensation des gaz d'échappement).

**Les multicyclones** sont utilisés dans tous les cas ou comme pré-dépoussiérage et séparation des étincelles pour un procédé de séparation des poussières en aval. En règle générale, les valeurs limites d'émission de poussières de 150 mg/m³ (à 11 % en volume d'$O_2$) peuvent être respectées. Les valeurs de poussières < 100 mg/m³ (pour 11 % en volume d'$O_2$) ne peuvent généralement pas être garanties sans mesures supplémentaires (mesures primaires ou procédé de dépoussiérage en aval). Les valeurs de poussière < 50 mg/m³ (pour 11 % en volume d'$O_2$) nécessitent un procédé de dépoussiérage en aval.

**Les filtres en tissu** ont fait leurs preuves dans les installations de combustion du bois qui fonctionnent pour couvrir la charge de base (un démarrage et une phase de combustion sur une longue période de fonctionnement de l'installation). L'utilisation d'un filtre en tissu dans les installations de combustion du bois à fonctionnement discontinu et à faible charge (nombreux démarrages et phases de combustion, fonctionnement fréquent en veille, interruptions de fonctionnement dues à de courts intervalles de nettoyage de la chaudière) sont problématiques en raison du refroidissement du filtre en tissu en mode veille, car les gaz d'échappement peuvent refroidir en dessous du point de rosée pendant la phase de démarrage, ce qui entraîne l'humidification du tissu. L'humidité et la poussière forment un dépôt sur le tissu qui ne peut être éliminé par le nettoyage à l'air comprimé et qui entraîne le colmatage du filtre en tissu. Plus le combustible est humide, plus les filtres en tissu ont tendance à se colmater.

Dans les installations de combustion du bois fonctionnant de manière discontinue à faible charge, **les électrofiltres** nécessitent un chauffage d'appoint (électrique ou via le système de chauffage) au niveau de l'accumulation des particules de poussière afin d'empêcher l'humidification des particules pendant la phase de démarrage et donc la formation d'un dépôt qui ne peut plus être évacué automatiquement. À l'heure actuelle, l'efficacité d'un séparateur électrique ne peut pas être vérifiée par une mesure continue des poussières fines. Les appareils de mesure optiques permettent de détecter les percées, p. ex. dans les filtres en tissu (contrôle du fonctionnement). Cependant, il n'est pas possible de mesurer de manière précise et continue la concentration en poussières fines. L'efficacité d'un électro-séparateur sur une durée de fonctionnement donnée peut être déterminée sur la base de la « FAQ 38 : Comment déterminer la disponibilité des électro-séparateurs ? ». L'intervalle pour la vérification de la disponibilité du séparateur électrostatique est fixé par l'autorité compétente. La disponibilité doit être prouvée au moins lors d'une mesure des émissions exigée par les autorités, p. ex. à l'aide du formulaire 1 ou 2 de la FAQ 38.

Le degré de séparation nécessaire est déterminé à partir de la teneur en poussière du gaz brut et de la valeur limite à respecter. Le procédé de séparation approprié est sélectionné à l'aide du Tableau 13..

Les points suivants sont importants, voire critiques, pour l'utilisation de procédés de séparation des poussières :

- Teneur en vapeur d'eau dans les gaz d'échappement (teneur en eau du combustible, teneur en eau variable)
- température des gaz d'échappement
- Dépassement du point de rosée
- Changements de charge et arrêts (phases d'arrêt nocturnes, arrêt le week-end, fonctionnement estival)
- Phases de fonctionnement avec une teneur élevée en oxygène causée par de l'air parasite ou des quantités d'air de combustion trop élevées
- Proportion élevée de matières non brûlées dans les cendres volantes.

Tableau 13.10 Critères de sélection des procédés de dépoussiérage.

| Critères | Évaluation | | |
|---|---|---|---|
| | Filtre en tissu | Séparateur électrostatique (électrofiltre) | Séparateur électrostatique humide |
| Combustible sec | ++[1)] | ++ | – |
| Combustible humide | –[2)] | + | ++ |
| Fonctionnement en charge variable | ++ | ++ | ++ |
| Fonctionnement discontinu | – | + | + |
| Teneur en poussières du gaz épuré mg/m³ à 11 % vol. $O_2$ | 1 - 5 | 5 - 50 | 5 - 20 |
| Degré de séparation | > 95 % | 90 % – 95 % | 90 % – 95 % |
| Ajout d'absorbant (additif) pour réduire les émissions de HCl, SOx et PCDD/F [3)] | ++ | – | – |
| Perte de charge (valeurs typiques) en mbar | élevée<br>10 - 20 | faible<br>1,5 - 3,0 | moyenne<br>5 - 10 |
| Besoins en énergie auxiliaire (valeurs typiques) en $kWhel/MWh_{th}$ | élevée<br>14 - 17 | faible<br>2 - 5 | moyen<br>5 - 10 |
| Encombrement | moyen | élevé | élevé |
| Plage de fonctionnement Température des gaz d'échappement | 140 - 220 °C | 80 - 250 °C | 40 - 60 °C[4)] |
| Bypass nécessaire | oui | facultatif | en option |
| Sensibilité aux particules incandescentes, aux étincelles | élevée | faible | faible |
| Coûts d'investissement | moyen | élevé | élevés |
| Coûts d'exploitation (maintenance et énergie auxiliaire) | élevés | faibles | moyen |

**Évaluation** ++ Très adapté, domaine d'application typique
+ adapté
– non adapté

[1)] Fonctionnement en charge continue avantageux
[2)] Convient sous certaines conditions en cas de fonctionnement en charge continue
[3)] Nécessaire par exemple pour le bois usagé
[4)] déshumidification généralement nécessaire, adapté en combinaison avec la condensation des gaz d'échappement

## 13.9.2 Sélection des procédés de réduction des oxydes d'azote

Le terme « oxyde d'azote » englobe le monoxyde d'azote NO et le dioxyde d'azote $NO_2$, dont la somme est souvent désignée par $NO_x$. Les procédés de réduction des $NO_x$ consistent à transformer le NO déjà formé en azote moléculaire $N_2$ à l'aide de composés intermédiaires azotés, par exemple selon la réaction $NO + NH_2 \rightarrow N_2 + H_2O$. Selon le procédé, des conditions de réaction appropriées (température, temps de séjour, agent réducteur) sont nécessaires à cet effet.

**Procédure**

1. Décider si une réduction des $NO_x$ est nécessaire
2. Déterminer le degré de dénitrification nécessaire pour respecter les exigences en matière d'émissions
3. Sélectionner le procédé de réduction des $NO_x$ approprié

La nécessité d'une réduction des $NO_x$ dépend, d'une part, des valeurs limites d'émission relatives à la concentration en $NO_x$ et au débit massique de $NO_x$ et, d'autre part, de la teneur en azote du combustible ou des émissions de $NO_x$ qui en résultent. Les émissions de $NO_x$ de la gamme de combustibles prévue doivent être déterminées pour des installations comparables ou estimées à partir de valeurs empiriques (par exemple le Tableau 4.9 ou le Tableau 13.). Le calcul du débit massique de $NO_x$ à partir de la concentration de $NO_x$ et du débit volumique des gaz d'échappement ainsi que le traitement des installations à une ou plusieurs chaudières sont décrits dans [137]. À partir de la concentration en $NO_x$ et de la puissance thermique de combustion, c'est-à-dire la puissance thermique nominale divisée par le rendement de la chaudière, il est possible d'estimer à l'aide de la Figure 13.8 si une réduction des $NO_x$ est nécessaire.

Tableau 13.11 Émissions typiques de $NO_x$ de différents combustibles dans des installations sans procédé de réduction des $NO_x$.

| Combustible | Émissions de NOx [mg/m³] | |
|---|---|---|
| | à 11 % $O_2$ | à 13 % $O_2$ |
| Faible teneur en azote, par exemple épicéa écorcé | 100 - 150 | 80 - 120 |
| Teneur moyenne en azote, p. ex. bois forestier avec écorce | 150 - 250 | 120 - 200 |
| Teneur élevée en azote, p. ex. écorce, bois mort, bois issu de l'entretien du paysage | 250 - 400 | 200 - 320 |
| Teneur élevée en azote, p. ex. panneaux de particules UF | 400 – 1'000 | 320 - 800 |

Si une réduction des $NO_x$ est nécessaire, il convient de déterminer le degré de dénitrification requis pour respecter les exigences en matière d'émissions et de sélectionner le procédé de réduction des $NO_x$ approprié à partir du Tableau 13..

Vous trouverez de plus amples informations dans le chapitre 5.8.2.

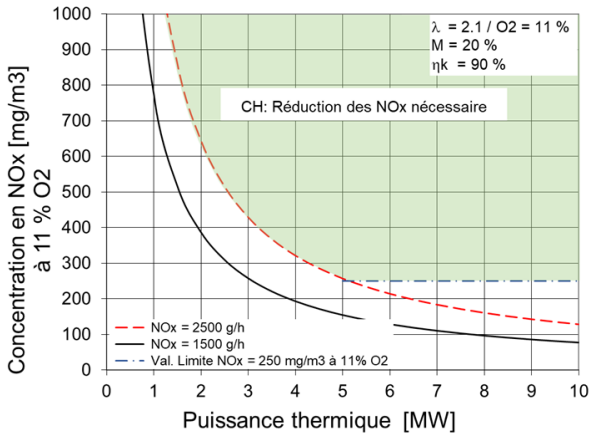



Figure 13.8 Concentration de $NO_x$ en fonction de la puissance thermique de combustion comme critère pour les mesures de réduction des $NO_x$.

Tableau 13.12 Degré de dénitrification et conditions limites de différents procédés de réduction des $NO_x$ (pour la description des procédés, voir le chapitre 5.8.2).

| Procédés de réduction des $NO_x$ | Degré de dénitrification<br>Teneur en N | Conditions limites |
|---|---|---|
| Mesures primaires « Low Nox » (sans réducteur) | | |
| Échelonnement de l'air | faible : 30 - 50 %<br>élevé : 50 - 70 % | Zone de réaction interne, indice d'air primaire 0,7 - 0,8, réaction à partir d'environ 1'100 – 1'200 °C, convient sous certaines conditions aux combustibles riches en cendres |
| Échelonnement des combustibles | faible : 40 à 50 %<br>élevée : 60 à 75 % | deux alimentations en combustible, zone de réaction interne, indice d'air primaire 0,8 – 0,9, réaction à partir d'environ 800 °C |
| Mesures secondaires « Denox » (avec agent réducteur) | | |
| Procédé SNCR | 50 à 75 % | Zone de réaction interne, plage de température d'env. 850 à 950 °C, rapport molaire important, sous-produits indésirables possibles |
| Procédé SCR faible teneur en poussières | 90 à 95 % | Plage de température 200 - 250 °C, séparation des poussières avant catalyseur |

L'activité des catalyseurs dans le procédé SCR est continuellement réduite par l'apport de métaux alcalins via les gaz d'échappement et l'efficacité des catalyseurs diminue progressivement, car ils sont contaminés par les métaux alcalins. C'est pourquoi le procédé SCR peut être utilisé en mode « low dust » avec un dépoussiérage en amont.

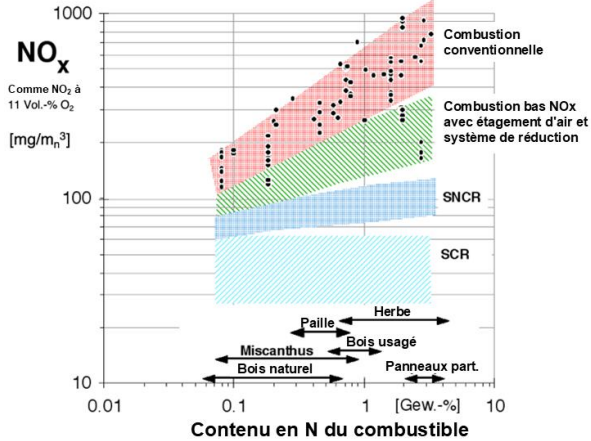



Figure 13.9 Comparaison des émissions de $NO_x$ en fonction des différentes teneurs en azote du combustible pour différentes mesures de réduction [121].

Les fabricants d'installations de combustion ne peuvent garantir le respect des valeurs limites d'émission de $NO_x$ que s'ils disposent d'informations précises sur la teneur en azote du combustible utilisé (analyses du combustible). Les teneurs en azote des différents types de combustibles indiquées dans le chapitre 4 (Tableau 4.9,Tableau 4.10 et Tableau 4.11) permettent d'estimer la teneur en azote du combustible.

### 13.9.3 Sélection des composants supplémentaires

Les composants supplémentaires tels que les accumulateurs de chaleur ou les économiseurs sont déterminés en fonction des exigences détaillées de l'installation de combustion du bois (voir chapitre 5.9 et chapitre 7.5).

# 13.10 Conception de la centrale de chauffage

## 13.10.1 Centrale de chauffage

### 13.10.1.1 Aménagement de la chaufferie, espace requis

Dans la mesure du possible, la chaufferie doit être placée directement à côté ou sous le silo afin d'éviter des installations de transport complexes et coûteuses. Les installations d'une puissance nominale supérieure à 200 à 400 kW nécessitent une hauteur de chaufferie supérieure à 3 m (une chaufferie à deux étages avec plateforme est également possible). Il faut en outre prévoir suffisamment d'espace pour l'entretien de l'installation et les travaux de nettoyage dans la chambre de combustion et sur la chaudière.

Lors de l'aménagement de la chaufferie, il faut tenir compte non seulement des composants supplémentaires tels que le dépoussiérage grossier et fin, mais aussi de l'intégration hydraulique des chaudières, des accumulateurs de chaleur, des chauffe-eaux, du système de distribution, de l'expansion, de l'armoire électrique, de l'épuration des gaz de combustion, des conteneurs à cendres, etc.

L'espace nécessaire doit être indiqué sur un plan d'aménagement du silo et de la chaufferie à l'échelle 1 : 50.

### 13.10.1.2 Intégration hydraulique de la chaudière

Pour l'intégration hydraulique de la chaudière, il convient de reprendre les schémas standard conformément à la norme QM Chauffages au bois (voir [62] ou [71]).

Afin de garantir la sécurité de l'approvisionnement en chaleur, telle qu'elle est définie dans le guide Q sous la rubrique Q-Forderung D.4.8 [15], les installations de chauffage monovalentes à chaudière unique doivent être équipées de raccords pour un chauffage d'urgence, par exemple une centrale de chauffage mobile.

### 13.10.1.3 Ventilation de la chaufferie

L'alimentation en air de combustion dans la chaufferie doit être garantie dans tous les cas. L'air de combustion doit toujours être prélevé directement à l'air libre par une ouverture d'alimentation en air et ne doit contenir ni poussière, ni gaz ou vapeurs nocifs ou inflammables. Dans les installations de grande taille, il faut prévoir une ouverture d'évacuation d'air en plus de l'ouverture d'alimentation en air. Les deux ouvertures doivent être disposées si possible en face l'une de l'autre ou en diagonale afin d'assurer une ventilation transversale de la chaufferie, ce qui empêche l'accumulation de chaleur en été.

Il est judicieux d'aspirer l'air de combustion au plafond de la chaufferie. Cela permet de réutiliser la chaleur perdue et de maintenir la partie supérieure de la chaufferie à une température plus fraîche.

Les chaudières à bois et leurs dispositifs de transport génèrent plus de bruit que les chaudières à mazout et à gaz. Les ouvertures d'arrivée et d'évacuation d'air de la chaufferie doivent respecter les dispositions en matière de protection contre le bruit mentionnées au chapitre 13.10.5. Elles sont donc souvent insonorisées à l'aide de grilles d'isolation acoustique ou, mieux encore, selon le « principe du snorkel » avec un silencieux à canal intégré.

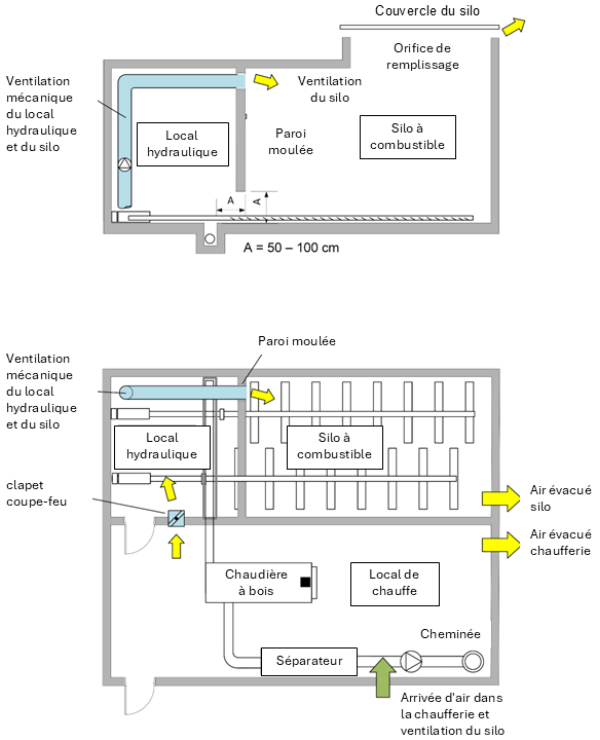



Figure 13.30 Ventilation combinée chaufferie et silo.

### 13.10.1.4 Dimensionnement du dispositif de ventilation

Les exigences relatives à la ventilation de la chaufferie et à l'alimentation en air de combustion sont les mêmes que pour les installations conventionnelles. La ventilation de la chaufferie et celle du silo sont souvent combinées (voir la Figure 13.).

Les principales fonctions du dispositif de ventilation sont les suivantes:

- Assurer l'alimentation en air de combustion (pour le calcul de la quantité d'air de combustion, voir le chapitre 20.8).
- Évacuer l'excès de chaleur accumulé dans la chaufferie. La puissance thermique perdue peut représenter environ 2 à 3 % de la puissance de la chaudière à bois en service en raison des pertes par rayonnement de la chaudière à bois, du séparateur de particules et de l'intégration hydraulique avec le réservoir de stockage. L'évacuation de la chaleur perdue dans la chaufferie doit être clarifiée afin que les températures sous le plafond de la chaufferie ne dépassent pas 30 °C (et 35 °C pendant une courte durée).
- Maintien d'une qualité de l'air dans la chaufferie permettant à une personne d'y séjourner sans nuire à sa santé.

- Prévention d'une dépression dans la chaufferie (< 10 Pa) qui perturberait le fonctionnement de l'installation et pourrait rendre difficile l'ouverture des portes d'entrée.
- Une ouverture transversale suffisamment grande doit être conçue et prévue conformément aux prescriptions en vigueur et aux formules qui y sont contenues (voir chapitre 19). En Suisse, par exemple, la section transversale de l'ouverture d'arrivée d'air peut être déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$A_{Zuluft}\left[cm^2\right] = 6\left[\frac{cm^2}{kW}\right] * \dot{Q}_K\left[kW\right]$$

Hypothèses :

$\dot{Q}$ Puissance de la chaudière en kW, $\eta_K$ = 85 %,
$\lambda$ = 2,
M = 40 % ; air entrant = 1 m/s

La section transversale $A_{air\ entrant}$ doit être agrandie si, en plus de l'air de combustion, d'autres flux d'air pénètrent dans la chaufferie, p. ex. lorsque

- la ventilation du silo tire son air d'alimentation de la chaufferie (voir chapitre 14.2.4).
- le débit d'air nécessaire pour évacuer l'excès de chaleur dans la centrale de chauffage est également aspiré à travers la même section transversale. Il convient de noter que par temps très chaud, l'installation de combustion peut ne pas fonctionner à sa puissance nominale et qu'un débit d'air de combustion plus faible peut donc être pris en compte dans le calcul.

En principe, toutes les prescriptions, normes et directives nationales et régionales pertinentes doivent être respectées pour le dimensionnement des dispositifs de ventilation.

## 13.10.2 Conteneurs de chauffage et centrales de chauffage comme éléments préfabriqués

Les conteneurs de chauffage et les centrales de chauffage en tant qu'éléments préfabriqués constituent des solutions transitoires et provisoires judicieuses pour la phase de démarrage d'un réseau de chauffage. Ils conviennent également comme solution définitive avec les caractéristiques suivantes:

- Construction: conteneurs ou éléments préfabriqués, posés sur des fondations au sol
- Stockage du combustible: intégré dans le conteneur ou l'élément préfabriqué pour les chaudières de faible puissance, conteneur de chauffage/élément préfabriqué pour les chaudières de forte puissance alimenté par deux conteneurs à fond mouvant d'un volume de silo de 36 m³ chacun ou d'autres éléments préfabriqués assemblés entre eux
- Puissance maximale de la chaudière industrielle: jusqu'à environ 500 kW pour une hauteur de conteneur de 3 mètres, jusqu'à environ 1'000 kW pour une hauteur de conteneur de 4 mètres.
- Puissance maximale des appareils de série: 250 kW à 450 kW. Plusieurs conteneurs peuvent être combinés, en règle générale, une à deux chaudières sont installées par conteneur (pellets, plaquettes de bois de qualité).
- Exigences relatives au combustible, voir chap. 13.3




Figure 13.31 Conteneur de chauffage (source: Jenni Energietechnik et Schmid energy solutions).



Figure 13.32 Installation en conteneur avec silo à combustible intégré et simple revêtement en bois (source: Energie-bois Suisse)

## 13.10.3 Besoins en énergie auxiliaire

Les besoins annuels en énergie auxiliaire dans la centrale de chauffage représentent environ 1.0 à 1.5 % de la quantité de chaleur produite, à condition que l'énergie auxiliaire soit utilisée de manière efficace. Pour les entraînements électriques, cela comprend:

- Des moteurs correctement dimensionnés
- Un bon rendement (notamment du ventilateur d'évacuation des gaz brûlés)
- Des moteurs à vitesse variable

Dans les installations équipées de séparateurs électriques, d'économiseurs, de systèmes de condensation des gaz d'échappement et d'autres systèmes, les besoins en énergie auxiliaire peuvent également être plus élevés.

## 13.10.4 Cheminée, conduit de fumée

### 13.10.4.1 Dimensionnement de la hauteur de la cheminée

Le dimensionnement de la hauteur de la cheminée doit être effectué conformément aux réglementations nationales et respecter les réglementations locales en matière de protection contre les incendies et le bruit (voir chap. 19).

Les facteurs suivants déterminent la hauteur de la cheminée:

- Dimensions du bâtiment (hauteur, largeur)
- Puissance calorifique
- Niveau d'émission en fonction de la zone d'obstacle la plus élevée dans la zone d'impact

### 13.10.4.2 Dimensionnement de la section transversale de la cheminée

Le dimensionnement de la section transversale de la cheminée doit être effectué conformément aux prescriptions spécifiques du pays (voir chap. 19). Il incombe au concepteur de s'assurer que le fournisseur de la cheminée a correctement dimensionné celle-ci et de vérifier, en concertation avec le fournisseur du foyer, que la cheminée proposée est conforme aux prescriptions en vigueur. Les spécifications suivantes fournies au fournisseur de la cheminée sont pertinentes pour le dimensionnement:

- Température des gaz de combustion et pression à l'entrée de la cheminée
- Hauteur de la cheminée et température requise des gaz de combustion à la sortie
- Humidité des gaz d'échappement.

### 13.10.4.3 Construction de la cheminée

Lors de la combustion de plaquettes de bois humides, le point de rosée des gaz de combustion est d'environ 60 °C. En principe, les cheminées en acier inoxydable bien isolées sont les mieux adaptées à ces conditions. Dans le cas des granulés de bois très secs, le point de rosée est légèrement plus bas, entre 40 °C et 45 °C, avec un excès d'air de 1.5 à 2.0.

Une prudence particulière s'impose lors de la rénovation si l'on utilise des cheminées existantes. Souvent, la seule solution consiste à installer un nouveau conduit de cheminée en acier inoxydable avec une isolation en vrac. Il faut veiller à ce que l'isolation en vrac soit correctement remplie, c'est pourquoi il est recommandé de faire appel à un fournisseur de cheminées ayant de l'expérience dans le domaine du chauffage au bois.

Dans les nouvelles installations, la chaudière à bois doit pouvoir fonctionner avec des températures de gaz d'échappement aussi basses que possible (< 150 °C), ce qui nécessite une cheminée bien isolée. Les types de cheminées possibles sont les suivants :

- Cheminées en céramique
- Conduites rigides en acier au chrome-nickel à paroi lisse d'une épaisseur de 1.0 à 1.5 mm.
- Cheminées composées de pièces individuelles.

La construction de la cheminée doit répondre aux exigences spécifiques du pays en matière de résistance à la combustion de suie et de statique.

### 13.10.4.4 Raccords pour les mesures d'émissions

Pour la mesure des émissions des installations soumises à réception et à mesure, un raccord normalisé doit être installé dans la partie verticale de la cheminée (par exemple « raccord normalisé EMPA », voir la Figure 13.). Une zone de stabilisation conforme aux prescriptions spécifiques du pays doit être prévue avant et après le raccord. La position exacte doit être clarifiée avec le ramoneur responsable et l'autorité de réception avant l'installation.

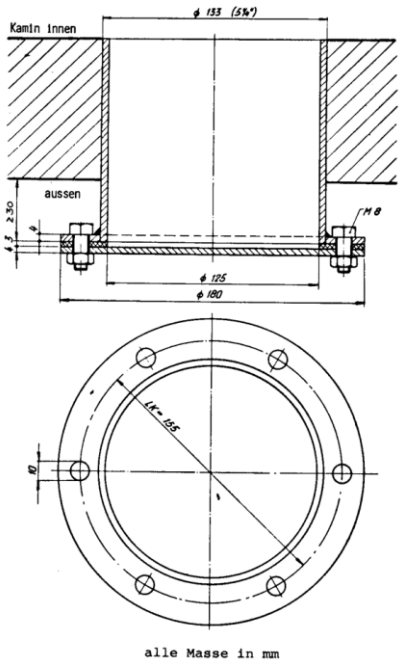



Figure 13.33 Dimensions d'installation du raccord normalisé EMPA [68].

## 13.10.5 Protection contre le bruit

Lors de la conception d'une installation de chauffage au bois automatique, il convient dans tous les cas de clarifier les effets de la propagation du bruit (bruit aérien et bruit solidien) lors du fonctionnement de l'installation. Le bruit aérien ne reste pas là où il est généré, mais se propage dans l'air et peut également traverser les éléments du bâtiment. Le bruit solidien est déclenché par des vibrations ou des oscillations, transmis par des corps solides et réémis sous forme de bruit aérien. Les énergies introduites dans un élément de construction sont nettement plus importantes que dans le cas du bruit aérien. La propagation du bruit solidien peut être considérablement réduite à l'aide d'éléments d'isolation contre les vibrations.

En matière d'isolation acoustique, les normes, prescriptions et directives en vigueur doivent être respectées. En Suisse, par exemple, à l'instar de l'aménagement du territoire (définition des types d'utilisation et de la hauteur des bâtiments), l'ordonnance sur la protection contre le bruit (OPB) définit les niveaux de sensibilité dans le cadre de l'aménagement du territoire. En fonction du type d'utilisation, la commune détermine, en attribuant un niveau de sensibilité, le niveau de bruit qu'une installation est autorisée à produire ou que les riverains doivent supporter.

L'ordonnance sur la protection contre le bruit fixe les valeurs limites des niveaux de pression acoustique maximaux pour les différentes zones. Le niveau d'évaluation correspond à la somme du niveau de mesure et de la correction du niveau. La correction du niveau est déterminée en fonction du contenu sonore et du contenu impulsionnel. Ainsi, par exemple, la valeur de correction du niveau pour les installations de transport (convoyeurs à chaînes à raclettes, convoyeurs à vis) qui fonctionnent par cycles et émettent un fort craquement au démarrage peut entraîner une augmentation supplémentaire significative du niveau d'évaluation.

Niv. d'évaluation = niv. de mesure + correction de niveau

Le niveau d'évaluation admissible dépend du niveau de repos diurne et nocturne. Ainsi, les émissions sonores d'une installation de chauffage au bois sont beaucoup moins problématiques lorsqu'il existe un niveau de repos élevé dû à d'autres sources d'émissions sonores telles que la circulation, l'artisanat et l'industrie.

Le manuel « Schallschutz in Haustechnikanlagen » ([138]) répertorie en détail d'autres mesures d'insonorisation dans le domaine des installations de chauffage.

En ce qui concerne la responsabilité du respect des prescriptions nationales en matière de protection contre le bruit (voir chapitre 19), les remarques suivantes peuvent être formulées:

- Lors de la constitution de l'équipe de planification, il convient de vérifier qui se chargera de la planification acoustique. La planification acoustique est une tâche interdisciplinaire qui implique tous les domaines spécialisés et doit être réalisée par un spécialiste de l'isolation acoustique.
- L'organisation qui assume la responsabilité globale du projet vis-à-vis du donneur d'ordre (architecte, planificateur général, entrepreneur général, consortium de planificateurs) doit désigner le spécialiste de l'insonorisation (par exemple, un ingénieur acousticien) chargé de la planification acoustique, avec les compétences et les responsabilités correspondantes.
- L'ingénieur en domotique ou le planificateur de l'installation de chauffage au bois est tenu d'attirer l'attention du spécialiste en isolation acoustique sur les sources de bruit de l'installation de chauffage au bois. Il doit également fournir les données techniques que le spécialiste en isolation acoustique demande concernant l'installation de chauffage au bois.

Les éléments suivants d'une installation de chauffage au bois sont des sources critiques d'émissions sonores et ont donné lieu à des réclamations dans le passé (voir Figure 13.).

**Ventilateur d'évacuation des gaz brûlés**
Le ventilateur d'évacuation des gaz brûlés est la principale source de bruit dans les installations de chauffage au bois. Les problèmes surviennent principalement dans les installations qui nécessitent une pression de refoulement élevée, en raison des niveaux de pression acoustique élevés à l'embouchure de la cheminée et dans les pièces adjacentes à la cheminée. Les mesures suivantes peuvent réduire les émissions sonores :

- Silencieux d'échappement.
- Séparer le raccordement entre le tuyau d'évacuation des gaz brûlés et la cheminée afin d'éviter la transmission des vibrations.
- Ventilateur à haut rendement, sans déséquilibre et pouvant fonctionner à une vitesse aussi basse que possible.
- Support du ventilateur d'évacuation des gaz brûlés sur des éléments amortisseurs de vibrations.
- Choisir l'emplacement de la cheminée de manière à ce que l'ouverture ne se trouve pas p. ex. juste à côté d'une fenêtre de chambre à coucher.
- Toute transmission de bruit solidien de la cheminée à la structure du bâtiment doit être empêchée.
- La cheminée ne doit pas être adjacente à des pièces soumises à des exigences élevées en matière d'isolation acoustique.

**Système d'extraction de silo**
Les mesures suivantes peuvent réduire les émissions sonores des fonds poussants, des vis d'extraction et des groupes hydrauliques:

- Séparer la structure du silo de la structure des pièces d'habitation ou de travail adjacentes afin d'éviter la transmission des bruits solidiens.
- Monter le groupe hydraulique sur des amortisseurs de vibrations et l'habiller d'un capot insonorisant.

**Système de transport: convoyeurs à chaîne à raclettes, vis sans fin**
Les mesures suivantes peuvent réduire les émissions sonores du système de convoyage:

- Séparer la chaufferie des pièces d'habitation ou de travail adjacentes afin d'éviter la transmission des bruits solidiens.
- Séparer le système de convoyage lors du montage à l'aide d'amortisseurs de vibrations ou de tapis isolants acoustiques afin d'éviter la transmission des bruits solidiens.

**Chaufferie**
La transmission des bruits aériens depuis la chaufferie peut être réduite par les mesures suivantes:

- Enveloppe du bâtiment fermée avec un coefficient d'isolation acoustique suffisamment élevé.
- Équiper les ouvertures vers l'extérieur de silencieux, par exemple en installant des coulisses d'isolation acoustique dans le conduit d'alimentation en air de combustion.
- Équiper le plafond de la chaufferie de panneaux d'absorption acoustique.
- Installer des ventilateurs d'air de combustion avec des silencieux d'aspiration.

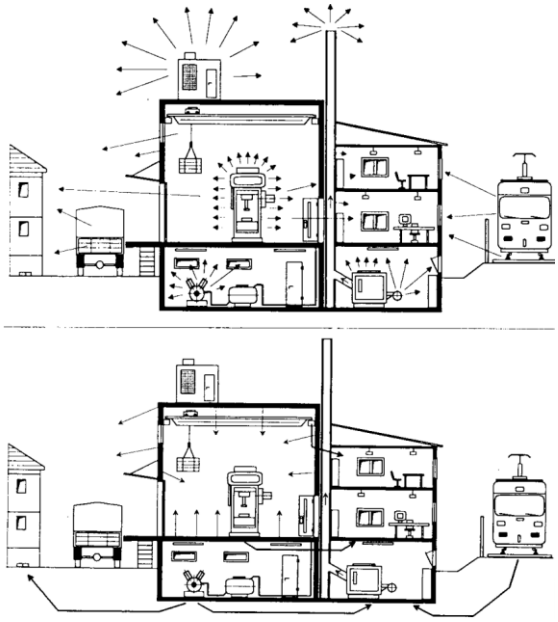


Figure 13.34 Bruit aérien et bruit solidien [68].

# 14 Conception du stockage et du transport du combustible

## 14.1 Remarques générales

Les conditions suivantes doivent être respectées lors de l'aménagement du stockage de combustible :

- Voie d'accès facilement accessible
- Possibilité pour le véhicule de livraison de faire demi-tour devant le lieu de déchargement sans manœuvres complexes (tenir compte du rayon de braquage nécessaire)
- Faible coût pour la logistique du combustible dans l'entrepôt : « premier entré, premier sorti »
- Utiliser la topographie du terrain pour faciliter le déversement du combustible (p. ex. lieu de déchargement situé au point le plus élevé en cas de pente)

Lors de la phase de conception du stockage de combustible, les différentes variantes d'agencement doivent être discutées avec le futur fournisseur de combustible afin de permettre une livraison rapide du combustible.

Dans le Tableau 14.1 présente les types de stockage de combustible en fonction de la gamme de combustibles et de la stratégie d'approvisionnement.

Il convient de tenir compte des exigences en matière de conception structurelle et d'exploitation conformément aux recommandations et réglementations nationales en vigueur (voir chapitre « 19 »). Il s'agit notamment des exigences suivantes:

- Protection contre les incendies et les explosions.
- Règles de sécurité permettant d'éviter les accidents corporels et garantissant que les personnes disposant d'un équipement de protection approprié puissent gérer les silos en toute sécurité.
- Procédure à suivre en cas de dysfonctionnements et leur élimination.
- Système d'évacuation d'urgence.

## 14.2 Sélection et dimensionnement du stockage du combustible

### 14.2.1 Types de stockage de combustible

Le choix et le dimensionnement appropriés du stockage de combustible dépendent de la gamme de combustibles, des besoins annuels en combustible et de la stratégie d'approvisionnement, qui peut être basée sur une chaîne d'approvisionnement directe, indirecte ou mixte. Le cas échéant, il convient également de tenir compte des conditions locales particulières (par exemple, disponibilité limitée du combustible pendant les vacances de Noël, accessibilité de la forêt en hiver, horaires de livraison restreints, etc.).

Dans le cas de l'approvisionnement en bois-énergie provenant de régions en altitude où l'abattage n'est pas possible toute l'année, le bois est entreposé à basse altitude ou directement à la centrale de chauffage au bois sous forme **de grumes empilées**, où il est déchiqueté en fonction de la demande ou entreposé sous forme de plaquettes dans des entrepôts. Cela permet la construction de petits silos peu coûteux chez les clients ou dans la centrale de chauffage au bois.

Types de stockage de combustible :

- **Silo** (trémie): un système de distribution automatique achemine le combustible stocké dans le silo vers le système de transport de la chaudière à bois.
- **Entrepôt**: le stockage intermédiaire du combustible à l'abri des intempéries s'effectue dans un entrepôt. L'entrepôt de la centrale de chauffage au bois dispose généralement d'un silo journalier.
- **Stockage extérieur**: stockage intermédiaire à l'air libre des plaquettes de bois sur des tas et des grumes sur des piles.

### 14.2.2 Dimensionnement

Le dimensionnement correct du stockage du combustible offre un potentiel d'économies important. Une optimisation détaillée est donc primordiale.

Pour des raisons de coût, le silo à combustible avec le système d'extraction doit être aussi petit que possible. Cependant, la taille ne peut être évaluée indépendamment de la logistique du combustible, mais fait partie intégrante du concept d'approvisionnement.

En règle générale, les coûts peuvent être maintenus dans des limites raisonnables si le silo à combustible, dans le cas **d'une chaîne d'approvisionnement directe**, peut contenir cinq à sept jours de consommation de l'installation de combustion à puissance nominale, plus le volume supplémentaire du silo.

**Volume supplémentaire du silo**
En règle générale, le silo à combustible n'est pas complètement vide à la livraison (délai nécessaire entre la commande et la livraison). Par conséquent, un volume supplémentaire doit être pris en compte en plus des besoins quotidiens spécifiés. Le volume supplémentaire du silo doit être égal au volume de transport du plus grand véhicule de livraison afin de garantir que le silo puisse être rempli avec les besoins quotidiens spécifiés à l'aide d'un véhicule de livraison à pleine charge.

Pour les chaudières monovalentes, cela correspond à une durée d'approvisionnement de six à huit jours, car les besoins en puissance thermique ne correspondent généralement pas à la puissance nominale de la chaudière pendant 24 heures. Au cours d'un hiver moyen, cela conduit à environ 20 chargements du silo à combustible. Dans le cas **d'une chaîne d'approvisionnement indirecte** avec une logistique de transport disponible à court terme à partir d'un entrepôt intermédiaire (p. ex. un hangar), la taille du silo à combustible peut être réduite à 2 à 4 jours de consommation. Les centrales de chauffage disposent souvent de grandes capacités de stockage (entrepôt, stockage en plein air avec empilement, etc.), de sorte que le stockage intermédiaire peut être effectué directement à la centrale. Dans ce cas, le silo à

combustible peut également être dimensionné de manière nettement plus petite (p. ex. pour couvrir les besoins d'une journée).

Le nombre de mouvements de véhicules pour l'approvisionnement du dépôt de combustible dépend des besoins annuels en combustible et de la capacité de transport du véhicule.

- **Directement** depuis la forêt: un camion peut transporter 40 à 50 (60) m³ de plaquettes de bois directement depuis la forêt, un camion avec remorque 70 à 80 m³. En principe, les plaquettes de bois livrés par un camion doivent pouvoir être déchargés immédiatement et, dans le cas d'un camion avec remorque, les 40 m³ supplémentaires doivent pouvoir être déchargées après 10 minutes de transfert.
- À partir **du site de stockage intermédiaire**: un camion avec semi-remorque à fond mouvant ou à fond coulissant peut livrer 80 à 90 m³.

Outre le volume de stockage, il convient également de veiller à trouver des solutions économiques pour la conception de l'entrepôt, les équipements auxiliaires nécessaires au remplissage et à la distribution du combustible, ainsi que les dispositifs de ventilation. De plus, les dispositifs de sécurité et les prescriptions correspondants doivent être respectés.

**Exemple de dimensionnement :**

Une chaudière à bois d'une puissance thermique nominale de 300 kW et d'un rendement $\eta_K$ de 90 % est alimentée par des plaquettes de bois (BD, Hu ≈ 900 kWh/m³v). Les **besoins quotidiens** de l'installation de combustion à puissance nominale sont les suivants :

$$B = \frac{E_{24h}}{H_U} = 24\frac{\dot{Q}}{H_U \eta_K} = 24\frac{300}{9000.9} = 8.9\frac{m3v}{j}$$

Pour un besoin quotidien en combustible multiplié par 5 plus un conteneur, le **volume net du silo** est donc de :

$$V_{Net} = 5\frac{j}{1} * 8.9\frac{m3v}{j} + 40m3v = 84.5m3v = 84.5m^3$$

Pour un taux de remplissage de 70 %, le **volume brut du silo** est donc de :

$$V_{Brut} = \frac{V_{Net}}{taux\ de\ remplissage} = \frac{84.5m^3}{0.7} \approx 121m^3$$

Le taux de remplissage peut être déterminé à partir de l'angle de talus du combustible ou à partir des informations relatives au système de distribution du silo (distributeur de silo ou convoyeur à insertion).

Tableau 14.1 Choix du type de stockage de combustible en fonction de la gamme de combustibles et de la stratégie d'approvisionnement.

| **Gamme de combustibles** | **Type de stockage de combustible** | **Chaîne d'approvisionnement** | **Dimensionnement** Besoins quotidiens de la chaudière à bois en fonctionnement à puissance nominale | **Besoins quotidiens** de la chaudière à bois en fonctionnement à puissance nominale |
|---|---|---|---|---|
| Pellets | Silo à pellets fermé, espace de stockage absolument sec<br>Silo rond hors sol | indirect | environ 20 jours de consommation, voir figure 35 selon [67] | |
| Plaquettes de qualité | Silo enterré, silo hors sol | indirect | 5 à 7 jours de consommation plus vol. suppl. du silo[1)] | |
| Plaquettes de bois jusqu'à P45S -M55+ | Silo enterré | direct | 5 à 7 jours de consommation plus vol. suppl. du silo[1)] | < 50 m³v/j |
| Plaquettes de bois jusqu'à P45S-M55+ | Silo rond hors sol | direct | 5 à 7 jours de consommation plus vol. suppl. du silo[1)] | > 50 m³v/j |
| Plaquettes de bois jusqu'à P45S-M55+ | Entrepôt avec silo journalier | mixte | minimum 7 jours de besoins | > 50 m³v/j |
| BEP, SPF, ED, END et BR jusqu'à P63-M55+ | Entrepôt avec silo journalier<br>Silo circulaire hors sol | mixte | besoins quotidiens minimaux pour 7 jours | |
| SPT | Silos ronds ou carrés | direct | Coordonner la production et les besoins | |

[1] En règle générale, le silo à combustible n'est pas complètement vide à la livraison (délai nécessaire entre la commande et la livraison). Par conséquent, il convient de prévoir un volume supplémentaire dans le silo en plus des besoins quotidiens spécifiés. Le volume supplémentaire du silo doit être égal au volume de transport du plus grand véhicule de livraison afin de garantir que le silo puisse être rempli avec les besoins quotidiens spécifiés à l'aide d'un véhicule de livraison à pleine charge.
m³v = mètre cube de plaquettes de bois

### 14.2.3 Conception du silo à combustible

**Silos enterrés**

Les silos enterrés (voir la Figure 14.1) peuvent être remplis directement à partir du véhicule de transport via une ou plusieurs ouvertures de remplissage sans dispositif auxiliaire. La dimension idéale et la plus économique est celle d'un silo haut avec une base carrée et un couvercle qui, dans la mesure du possible, n'est pas praticable. Pour atteindre un taux de remplissage > 70 % au niveau d'une ouverture de remplissage du silo, le rapport hauteur/largeur doit être d'au moins 1. La forme du silo est idéalement complétée par d'autres cubes alignés les uns à côté des autres. Pour atteindre un taux de remplissage > 70 % avec d'autres dimensions de silo, le combustible peut être introduit soit par plusieurs ouvertures de silo, soit à l'aide de vis sans fin de remplissage ou de distributeurs de silo.

L'ouverture du silo doit avoir une longueur minimale de 3.5 m et une largeur minimale de 2 m. Cela permet de réduire la charge de travail lors du déchargement :

- Temps de déchargement plus court grâce à moins de manœuvres du camion et à un meilleur écoulement des plaquettes de bois
- Pas de nettoyage ultérieur de la zone de déchargement
- Moins de dommages au couvercle du silo.

Les silos enterrés présentent l'avantage d'avoir un taux de remplissage élevé (> 70 %). De plus, ils ne nécessitent pas de dispositifs coûteux pour le remplissage et la distribution. Parmi leurs inconvénients, on peut citer le fait qu'ils ne sont parfois pas réalisables en cas de problèmes liés à la nappe phréatique et qu'ils entraînent généralement des coûts de construction plus élevés (travaux d'excavation et de bétonnage).



Figure 14.1 Alimentation d'un silo enterré (source: Energie-bois Suisse).

La taille et la géométrie du silo sont déterminées par l'exigence de faibles coûts et par la largeur maximale de 2 m d'une unité de poussoir. Pour les silos plus larges, il faut prévoir plusieurs poussoirs, ce qui a une incidence sur les coûts. D'autres facteurs influant sur la géométrie et la taille sont l'exigence d'un taux de remplissage aussi élevé que possible (> 70 %) et l'angle de talus des plaquettes de bois. Celui-ci est généralement de 45°. Ainsi, pour les silos enterrés avec des ouvertures de remplissage au niveau du sol, il convient de viser un silo haut, dont la hauteur ne doit toutefois pas dépasser 1.5 fois la largeur afin d'éviter la formation de ponts, en particulier avec des plaquettes humides.

Pour déterminer la hauteur de **l'ouverture de passage entre le silo et le canal de transport transversal** (Figure 14.2), il faut tenir compte du comportement d'écoulement et de l'angle de talus du combustible (voir la Figure 14.2).

Pour les plaquettes de bois présentant un bon comportement d'écoulement (angle de talus d'environ 45°), la hauteur de l'ouverture de passage peut être fixée de manière définitive. Elle doit être choisie de manière à correspondre au maximum à la distance entre le coin de l'ouverture de passage côté silo et le début du canal de transport transversal, mais elle doit être d'au moins 50 cm. Cela permet de garantir qu'aucune plaquette ne s'écoule de manière incontrôlée dans le canal de transport transversal et ne surcharge le système de transport transversal.

Pour les combustibles dont le comportement à l'écoulement et l'angle de talus ne sont pas connus (bois usagé broyé, bois broyé provenant de l'entretien du paysage, écorce), la hauteur de l'ouverture de passage doit être variable au niveau de la conception, par exemple à l'aide de planches de bois qui peuvent être retirées ou insérées si nécessaire. Dans la pratique, on détermine ensuite la hauteur nécessaire pour que le combustible ne s'écoule pas de manière incontrôlée dans le canal de transport transversal et qu'il n'y ait pas de compression. La compression du combustible contre la paroi immergée ou contre les planches de bois au-dessus de l'ouverture de passage peut empêcher le déchargement du combustible.

L'évacuation sans problème des combustibles à comportement d'écoulement défavorable du silo peut également être obtenue en installant un rouleau doseur au-dessus de l'ouverture de passage (voir la Figure 6.21).

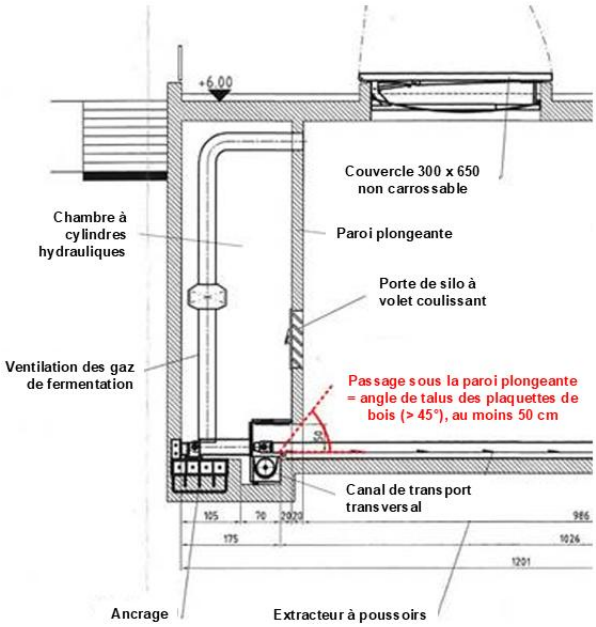



Figure 14.2 Ouverture de passage du silo vers le canal de transport transversal (source: Energie-bois Suisse).

Certains fournisseurs de plaquettes de bois disposent, outre des conteneurs d'une capacité de 30 à 40 m³, de **conteneurs-souffleurs** d'une capacité maximale de 30 m³. Ces conteneurs-souffleurs permettent d'alimenter le silo en plaquettes de qualité malgré une disposition défavorable de l'espace de stockage. Une solution avec des couvercles de silo et une benne de déchargement coûteuse avec des vis sans fin de remplissage peut ainsi être évitée. Lors du soufflage des plaquettes de bois, il faut toutefois veiller à ce que l'air de transport généré par le transport des plaquettes puisse s'échapper du silo. L'ouverture correspondante doit être prévue si possible au niveau de l'ouverture de remplissage. Le pompage entraîne des coûts supplémentaires. Le temps de remplissage est d'environ 30 minutes pour 30 m³.

Si un silo doit être rempli avec des camions à benne basculante malgré des conditions de chargement difficiles, une benne de déchargement à l'extérieur du bâtiment avec un système de convoyeur à vis sans fin est nécessaire (voir la Figure 6.11).

**Conteneur mobile pour plaquettes avec extraction en remplacement du silo**
Lors de l'installation ultérieure d'un système de chauffage au bois, la construction d'un silo souterrain est dans la plupart des cas très coûteuse ou n'est pas toujours possible en raison des conditions structurelles. Dans ce cas, un approvisionnement par des conteneurs mobiles de 30 m³ avec extraction par fond poussant intégré est envisageable. Un ou plusieurs conteneurs sont raccordés au système de transport (commun) sur une aire appropriée à l'extérieur ou à l'intérieur du bâtiment. La connexion est assurée par un convoyeur transversal fixe qui transporte les plaquettes déchargées vers le système d'alimentation du foyer. Le groupe d'entraînement du fond mouvant du conteneur est placé dans la chaufferie.

**Silos ronds**
Dans les centrales de chauffage au bois dont la puissance de la chaudière est supérieure à 5 MW, le stockage du combustible peut s'effectuer dans un entrepôt avec silo journalier ou dans **des silos ronds** hors sol avec extraction par vis sans fin. Afin d'éviter la formation de ponts, la hauteur de remplissage maximale du silo rond doit être limitée en fonction de la fluidité du combustible.

Les hauteurs de remplissage maximales $H_{max}$ suivantes sont considérées comme valeurs indicatives :

- Plaquettes humides, faible teneur en fines, longueur maximale des particules 200 mm: $H_{max}$ = 1,5 x D (diamètre du silo rond)
- Bois usagé sec et broyé, faible teneur en fines, longueur maximale des particules 200 mm: $H_{max}$ = 1,0 x D (diamètre du silo rond)

Si le combustible humide reste longtemps dans le silo rond, il sèche et a tendance à former des ponts. Cela réduit la fluidité et rend impossible l'extraction automatique du combustible.

## 14.2.4 Ventilation du silo

Les silos pour combustible sec (plaquettes) ne sont pas ventilés. Cela empêche le combustible d'absorber l'humidité de l'air. Dans les silos fermés contenant du combustible humide, l'humidité accrue de l'air doit être évacuée au moyen d'une ventilation mécanique. De plus, le stockage de plaquettes de bois humides génère des gaz de fermentation, dont du $CO_2$, en raison des processus de dégradation. Le $CO_2$ étant plus lourd que l'air, il se répand au sol du local de stockage du combustible, du local hydraulique et du local de chauffage et s'accumule aux points les plus bas. Afin d'éviter tout risque d'asphyxie pour le personnel de maintenance, les zones concernées doivent être protégées par des dispositifs de ventilation appropriés. Les dispositifs de sécurité et les prescriptions spécifiques au pays figurant au chapitre19 doivent être respectés.

Le dégagement d'humidité des plaquettes de bois entraîne une humidité relative élevée dans le silo à combustible. Celle-ci se condense sur les parois froides, le plafond et en particulier sur les couvercles de silo non isolés, ce qui provoque une nouvelle humidification du combustible. L'eau étrangère à la surface du combustible peut provoquer une forte formation de moisissures. Pour éviter cela, l'humidité accumulée doit être évacuée par le système de ventilation (commandé par une minuterie) qui ventile le silo dans le sens transversal. Les parois, le plafond et le couvercle du silo de stockage du combustible peuvent ainsi être maintenus au sec.

**Ventilation du silo avec l'air extérieur**
L'air extérieur pénètre dans la salle hydraulique par un puits de lumière. À proximité du sol, l'air est acheminé mécaniquement dans le silo à plaquettes par un système de ventilation, puis évacué vers l'extérieur par le couvercle du silo ou le puits de lumière. En cas de ventilation intermittente, le système de ventilation doit être conçu pour assurer un renouvellement de l'air de la salle hydraulique 3 à 5 fois par heure, la ventilation devant fonctionner pendant au moins 10 minutes par heure.

La ventilation intermittente n'est pas nécessaire si le système de ventilation est conçu pour assurer un renouvellement de l'air 20 fois par heure et si un délai de 15 minutes est respecté entre la mise en marche de la ventilation et l'entrée dans la salle (p. ex. grâce à une porte verrouillée par une minuterie avec dispositif de verrouillage).

S'il existe des ouvertures directes entre la salle hydraulique et le silo, par exemple parce que le canal de transport transversal dans la salle hydraulique n'est pas fermé, un flux d'air peut se produire entre le silo et la salle hydraulique. Afin que les gaz de fermentation et l'humidité de l'air puissent tout de même être évacués, un système d'aspiration supplémentaire doit être installé dans le silo au-dessus du combustible. Pour que l'air extérieur puisse s'engouffrer, son débit doit être légèrement supérieur à celui de l'aspiration dans la salle hydraulique.

Il convient de noter en particulier que lorsque le niveau de remplissage dépasse cinq mètres, les gaz de fermentation qui se forment au-dessus du produit en vrac doivent être évacués de manière contrôlée.

Lorsque l'air extérieur est froid et le combustible humide, des problèmes de givrage peuvent survenir dans la salle hydraulique et dans le réseau de conduits de ventilation en raison de la condensation.

**Ventilation combinée de la chaufferie et du silo**
Il est judicieux de combiner les dispositifs de ventilation de la chaufferie et du silo, car l'air chaud provenant de la chaufferie réduit les problèmes de givrage dans la chambre hydraulique et favorise le séchage des plaquettes de bois. En cas de ventilation intermittente, le système de ventilation doit être conçu pour assurer un renouvellement d'air de 3 à 5 fois par heure dans le local hydraulique, la ventilation devant fonctionner pendant au moins 10 minutes par heure.

La ventilation intermittente n'est pas nécessaire si le système de ventilation est conçu pour assurer un renouvellement de l'air 20 fois par heure et si un délai de 15 minutes est respecté entre la mise en marche de la ventilation et l'entrée dans la pièce (p. ex. avec une porte verrouillée par une minuterie).

L'air extérieur pénètre dans la chaufferie par un volet de protection contre les intempéries (voir Figure 13.). Une partie de l'air est acheminée vers le foyer par les ventilateurs d'air de combustion, le reste s'écoule à travers le clapet coupe-feu vers la salle hydraulique. Là, l'air est transporté mécaniquement par un système de ventilation vers le silo à plaquettes et évacué vers l'extérieur sous forme d'air humide.

Si des ouvertures directes existent entre la chambre hydraulique et le silo, par exemple parce que le canal de transport transversal dans la chambre hydraulique n'est pas fermé, un flux d'air peut se produire entre le silo et la chambre hydraulique. Afin que les gaz de fermentation et l'humidité de l'air puissent tout de même être évacués, il faut, à l'aide d'un ventilateur tubulaire supplémentaire placé devant le clapet coupe-feu, acheminer dans le compartiment des pistons un peu plus d'air chaud de la chaufferie que le ventilateur n'en aspire dans le compartiment des pistons.

Si la chaufferie est nettement plus basse que la chambre hydraulique et le silo, la porte entre la chaufferie et la chambre hydraulique doit être parfaitement étanche. Sinon, il existe un risque d'accumulation de gaz de fermentation dans la chaufferie, en particulier en cas de faible charge et en été, lorsque l'installation est à l'arrêt mais qu'il reste encore des plaquettes dans le silo.

Si le niveau du sol du silo est plus bas que celui de la chaufferie, l'air froid extérieur peut s'écouler de la chaufferie vers la chambre hydraulique et entraver le processus de séchage souhaité. Cela peut être évité en installant un tuyau de ventilation supplémentaire avec un ventilateur tubulaire qui achemine l'air chaud du plafond de la chaufferie directement vers la chambre hydraulique via un clapet coupe-feu.

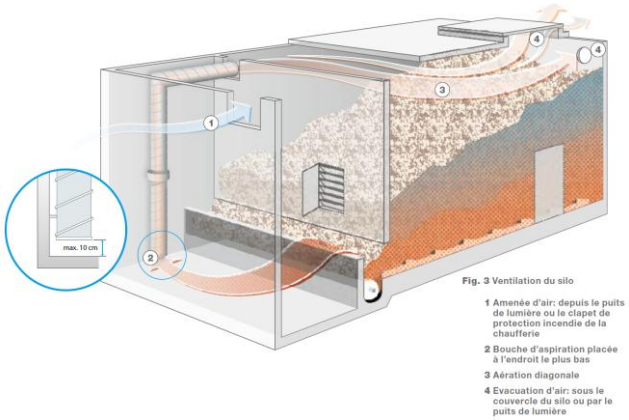



Figure 14.3 Ventilation du silo (source: Suva [139]).

**Évacuation de l'air vicié du silo**
Lors du placement de l'ouverture d'évacuation de l'air du silo, il faut tenir compte du fait que les gaz de fermentation ont une odeur désagréable. En cas de nuisance olfactive potentielle, il est recommandé d'évacuer l'air du silo par le toit à l'aide d'un système d'évacuation d'air séparé.

## 14.2.5 Conception de l'entrepôt

Pour les installations de petite et moyenne taille, on utilise généralement un silo pour le stockage du combustible. Pour les installations d'une taille supérieure à 2 MW, un entrepôt est nettement plus économique (Figure 14.4). Pour les installations < 2 MW avec une chaîne d'approvisionnement directe, la construction d'un entrepôt avec une surface de stockage accessible aux véhicules, dont une partie est équipée d'un fond mouvant accessible aux véhicules, et avec un silo journalier peut également être une solution économique si l'on peut se passer d'un silo souterrain coûteux. Pour les très grandes centrales de chauffage au bois, les silos ronds hors sol constituent une alternative à l'entrepôt pour le stockage du combustible.



Figure 14.4 Entrepôt (source: Energie-bois Suisse).

La gestion d'un entrepôt s'effectue selon la logistique suivante:

- Gestion de l'entrepôt et alimentation du silo journalier et du fond mouvant à l'aide d'un chargeur sur pneus ou télescopique
- Système de grue entièrement automatisé, équipé d'une benne de déchargement et d'un silo journalier

- Système de chargement et d'extraction avec convoyeur à chaîne à raclettes. Pré-silo avec fond mouvant ou à raclettes pour le chargement du convoyeur à chaîne à raclettes, extraction du combustible vers le système d'alimentation de la chaudière avec fond mouvant
- Alimentation à partir de la benne de déchargement avec système de convoyeur à vis, extraction avec fond mouvant
- Stockage et extraction avec un système spécial tel qu'un chargeur par le haut.

Dans les entrepôts, il convient de veiller à une bonne ventilation transversale afin que l'humidité s'échappant du combustible stocké soit bien évacuée. Dans le cas d'un système à grue et d'un système de chargement et d'extraction avec convoyeur à chaîne à raclettes, il convient de prévoir en outre un système d'alimentation d'urgence dans le silo journalier afin que l'installation de chauffage au bois puisse continuer à fonctionner en cas de panne du système de gestion de l'entrepôt. Dans le cas du système de grue, le combustible peut par exemple être déversé directement sur le fond mouvant du silo journalier, qui achemine le combustible vers le système d'alimentation. Dans le cas du système de chargement et d'extraction, le combustible peut par exemple tomber sur le système d'alimentation par une ouverture dans le canal de transport du convoyeur à chaîne à raclettes.

### 14.2.6 Stockage extérieur

Les entrepôts extérieurs (entrepôts à ciel ouvert) destinés au stockage de plaquettes de bois en tas ou de bois rond en piles près de la centrale de chauffage ou dans un lieu central doivent être ensoleillés et accessibles toute l'année (Figure 14.5 et Figure 14.6).

Les pertes d'énergie accrues dues à la perte de substance constituent un inconvénient pour les plaquettes de bois stockés à l'extérieur.

Dans le cas des plaquettes de bois stockés en tas et gérés à l'aide d'un convoyeur à roues, il convient d'éviter toute contamination par du sable et des pierres. Les tas doivent être entreposés sur une surface goudronnée avec drainage ou sur un sol sec et stabilisé.



Figure 14.5 Stockage extérieur de plaquettes de bois en tas (source: Energie-bois Suisse).



Figure 14.6 Stockage à l'air libre de bois rond sur un tas (source: Energie-bois Suisse).

Lors du stockage de combustibles humides tels que les plaquettes de bois issus de résidus forestiers, de résidus industriels, de bois provenant de l'entretien du paysage, de bois d'éclaircie et d'écorce broyée ou non broyée, les conditions suivantes doivent être respectées :

- Une bonne aération du combustible sur le tas est obtenue grâce à une faible proportion de fines, y compris les aiguilles, les feuilles et les brindilles, et à une grosse taille des morceaux de combustible.
- Une forte proportion de fines particules et une petite taille des morceaux empêchent le séchage uniforme du combustible et favorisent la formation de moisissures à la surface du tas. La remontée de l'humidité est empêchée dans les couches à forte proportion de fines particules, et l'humidité libérée se condense à nouveau dans ces couches (en particulier à la surface du tas).
- La dégradation de la matière sèche dans le combustible (valeurs de dégradation élevées pouvant atteindre 4 % par mois en cas de forte teneur en eau) peut être réduite par des temps de transbordement courts et un séchage optimal du combustible avec une granulométrie grossière (bien aérée). Cette remarque s'applique également au stockage du combustible dans des silos ou des entrepôts.
- En particulier pour les combustibles à cellules ouvertes tels que le bois résineux, le séchage du combustible peut être optimisé pendant une période de stockage prolongée en recouvrant les tas de toiles qui réduisent considérablement l'humidification du combustible par les précipitations. Les tas de bois résineux sont en partie recouverts de films déchiquetables afin d'éviter l'humidification.
- Le taux de séchage du combustible, qui peut atteindre une réduction de 10 % de la teneur en eau au cours du premier mois, est nettement plus élevé en été et pendant la période de transition qu'en hiver.

### 14.2.7 Combustion spontanée et pertes de matière

Le stockage de grandes quantités de plaquettes de bois présente un risque d'auto-inflammation. Le risque est accru lorsque plusieurs des conditions suivantes sont réunies:

- Durée de stockage particulièrement longue (p. ex. plus de 3 mois)
- Stockage par temps chaud (mois d'été)
- Le combustible est humide et éventuellement encore vert lors du stockage.

- Le combustible contient une grande proportion d'aiguilles ou de feuilles.
- Le combustible est en partie broyé très finement.
- Le combustible contient une forte proportion d'écorce fraîche ou de fines branches (p. ex. matière nutritive provenant de la couronne).
- Le broyage a été effectué à l'aide de déchiqueteuses ou de broyeurs à lames émoussées.
- Différentes qualités (p. ex. grossier/fin, humide/sec, bois de cime/bois de tronc) sont stockées les unes après les autres dans le même entrepôt.
- Le combustible est hétérogène et est stocké en différentes couches (formation de tas). Des couches limites se forment entre les différents combustibles de qualité ou d'origine différentes.
- Le combustible est empilé relativement haut (> 4 m).
- Lors du stockage, les marchandises sont compactées par le passage de véhicules de chargement.
- Selon le type de gestion du stockage et en particulier lors de phases de stockage prolongées, le matériau stocké en premier n'est pas retiré en premier. Cela signifie que la durée de stockage du combustible n'est pas uniforme.

Outre le risque d'auto-inflammation, de telles conditions de stockage entraînent également des pertes d'énergie considérables, parfois imperceptibles de l'extérieur, dues à la dégradation biologique. Pour les plaquettes à granulométrie fine stockées dans des conditions humides, ces pertes sont de 2 à 3 % par mois. C'est pourquoi, pour des raisons économiques, il est déconseillé de stocker à long terme des plaquettes de bois problématiques.

Il convient donc de combiner les mesures suivantes pour éviter les incendies par auto-inflammation :

- Stockage séparé des différentes qualités de plaquettes de bois dans des tas distincts
- Éviter une teneur en eau élevée dans les produits stockés en laissant sécher le bois avant de le broyer
- Éviter d'utiliser des outils de coupe ou des broyeurs émoussés lors du broyage
- Structure des plaquettes de bois aussi grossière que possible
- Éviter les proportions importantes d'aiguilles ou de feuilles, substances facilement attaquées par les micro-organismes
- Durée de stockage courte (en particulier lorsque les températures extérieures sont élevées au moment du stockage)
- Bonne circulation de l'air (apport de chaleur et évacuation de l'humidité)
- Hauteur de remplissage < 4 m (si possible en forme de cône ou de tas pointu)
- Faible section transversale pour les entrepôts extérieurs (largeur des andains < 6 m)
- Éviter le stockage à long terme (notamment en raison des pertes de combustible)
- Si nécessaire, séchage actif ou refroidissement par ventilation
- Utilisation de sondes de température pour la surveillance (les sondes utilisées pour la surveillance des meules de foin, par exemple, sont appropriées).
- Respecter la distance minimale par rapport aux bâtiments ou autres entrepôts ainsi que la quantité maximale stockée.

**Prévention des incendies**

Lors du stockage de combustible, une attention particulière doit être accordée à la prévention des incendies et les réglementations en vigueur en matière de protection contre les incendies doivent être respectées. Les pompiers compétents connaissent les conditions locales et des plans d'intervention élaborés conjointement doivent être disponibles.

Si l'entrepôt est ouvert ou démoli pour lutter contre un incendie, l'apport d'oxygène peut provoquer un incendie à ciel ouvert.

### 14.2.8 Conception du silo à plaquettes

La taille du silo est déterminée sur la base du bilan mensuel des besoins en bois-énergie et de la production mensuelle de résidus de bois. Un silo à plaquettes sert à la fois de dépôt de combustible et de tampon pour absorber l'afflux de matière. Les concepteurs doivent déterminer la quantité de résidus de bois produite sur une certaine période et la part de celle-ci pouvant être valorisée comme bois-énergie. Les résidus de bois excédentaire peuvent être livrés à des tiers. Les silos ronds ou carrés sont les formes les plus appropriées.

Il convient de respecter les exigences en matière de conception structurelle et d'exploitation conformément aux recommandations et prescriptions en vigueur (voir chapitre 19), en particulier :

- La protection contre les incendies et les explosions
- Les règles de sécurité afin d'éviter les accidents corporels et de permettre aux personnes disposant d'un équipement de protection approprié de gérer les silos en toute sécurité
- Procédure à suivre en cas de dysfonctionnements et leur élimination
- Système de déchargement d'urgence

### 14.2.9 Conception des entrepôts à pellets

La brochure « Recommandations pour le stockage des granulés de bois » [67] décrit en détail les exigences suivantes relatives à la conception structurelle et à l'exploitation d'un entrepôt de granulés :

- Livraison et acheminement des granulés dans les règles de l'art
- Disposition du tapis de protection contre les chocs
- Caractéristiques telles qu'un local de stockage sec (aucune infiltration d'humidité), des murs et des passages muraux étanches à la poussière, des exigences statiques, une protection contre les explosions, etc.

- Volume de stockage ou capacité en fonction de la puissance nominale des chaudières à granulés
- Système d'extraction en fonction de la puissance nominale des chaudières à granulés
- Ventilation de l'espace de stockage pour éviter les concentrations élevées de CO et les risques pour les personnes
- Les entrepôts de granulés de plus de 50 m³ doivent être équipés d'une porte donnant sur l'extérieur
- Nettoyage de l'espace de stockage
- Protocole de transfert du silo à pellets.

En outre, des consignes de sécurité doivent être respectées lors de l'accès au local de stockage des granulés afin d'éviter tout accident corporel dû à des concentrations toxiques de CO.

Les entrepôts de granulés doivent respecter les prescriptions et directives locales en vigueur en matière de protection contre les incendies, de prévention des accidents et autres (voir chapitre 19).

## 14.3 Sélection et dimensionnement du système d'alimentation en combustible

### 14.3.1 Remarques générales

Le choix et les dimensions appropriés du système d'alimentation en combustible dépendent du type de combustible et de sa fluidité. Celle-ci est déterminée par la taille des particules (granulométrie), la teneur en eau, la proportion de fines et la technique de traitement. Le combustible déchiqueté présente des surfaces de coupe, tandis que le combustible broyé présente des surfaces de rupture. Le choix du système d'évacuation et de transport du combustible en fonction de la gamme de combustibles et du type de stockage est indiqué dans le Tableau 14.2.

Les granulés ou les plaquettes de bois secs de qualité avec une faible proportion de fines présentent une grande fluidité.

### 14.3.2 Transport du combustible

La planification peut et doit influencer le dimensionnement des installations d'extraction et de transport en vérifiant que le système de transport et son dimensionnement répondent aux exigences de sécurité de fonctionnement pour la gamme de combustibles spécifiée.

Le principe de transport dépend du combustible. La taille et les dimensions des installations de transport sont généralement déterminées par le fournisseur du système de combustion en fonction de la puissance de la chaudière et de la taille du silo. Le planificateur ou la planificatrice a toutefois une influence décisive sur la disposition du silo et de la chaudière. Outre l'exigence selon laquelle le stockage du combustible et la chaudière doivent être aussi proches que possible l'un de l'autre, il convient de veiller, dans le cas d'installations à plusieurs chaudières, à ce que chaque unité de combustion dispose de son propre système de transport. L'accessibilité à la chaudière, au séparateur de cendres volantes, au filtre à particules fines et à la cheminée ne doit pas être entravée par les installations de transport.

Tableau 14.2 Choix du type de stockage de combustible en fonction de la gamme de combustibles, du système d'évacuation et de transport du combustible.

| Type de combustible | Type de stockage | Système de système d'extraction | Système de transport du combustible | Système d'alimentation chaudière |
|---|---|---|---|---|
| Pellets | Local de stockage fermé pour granulés<br>Absolument sec<br>Silo rond hors sol | Extraction par vis centrale<br>Extraction à ressort<br>Extraction par bras articulé<br>Extraction centrale<br>Extraction par fond poussant | Vis sans fin | Vis sans fin à raclettes |
| Plaquettes de bois de qualité | Silo enterré<br>Silo hors sol | Extraction à ressort<br>Extraction à bras articulé<br>Extraction centrale<br>Extraction par fond poussant | Vis sans fin | Vis sans fin |
| Plaquettes de bois jusqu'à<br>P45S-M55+ | Silo enterré<br>Silo rond hors sol<br>Entrepôt avec silo journalier | Extraction par fond poussant<br>Extraction par vis sans fin | Vis sans fin<br>Convoyeur à raclettes<br>Fond à poussée transversale<br>Convoyeur à poussée | Vis sans fin et double<br>Poussoir<br>Poussoir direct |
| BEP, SPF, ED, END<br>Bois usagé jusqu'à<br>P63<br>M55+ | Entrepôt avec silo journalier Silo circulaire hors sol | Extraction par fond poussant<br>Extraction par vis sans fin | Convoyeur à raclettes<br>Fond transversal<br>Convoyeur à poussée | Poussoir<br>Poussoir direct |
| SPT | Silos ronds ou carrés | Extraction conique<br>Extraction centrale<br>Extraction par fond poussant<br>Extraction par vis sans fin | Vis sans fin | Vis sans fin |

* Longueur maximale des particules 200 mm

## 14.3.3 Extraction

**Extraction du silo**
Pour les plaquettes de bois forestiers humides, les plaquettes de bois provenant de l'industrie du sciage et les écorces, il est recommandé d'utiliser un silo à fond mouvant. Le fond mouvant est insensible aux morceaux de combustible surdimensionnés et aux corps étrangers tels que les pierres. Le dimensionnement du fond mouvant (en particulier les tiges de poussée et les vérins hydrauliques) doit être adapté à la hauteur de remplissage maximale possible ou admissible et doit être spécifié et vérifié par le concepteur.

Pour les silos à plaquettes de forme ronde et carrée, on utilise des vis sans fin centrales qui transportent le combustible vers le centre, tandis que pour les silos de petit diamètre, on utilise également des vis sans fin coniques, plus économiques. Pour les silos de forme rectangulaire, on utilise une vis sans fin pendulaire ou un fond mouvant pour l'extraction du silo.

**Extraction du silo à pellets**
Le système d'extraction du silo à pellets s'effectue souvent à l'aide d'une vis sans fin centrale associée à un fond incliné (pour les petites capacités de stockage) ou à l'aide d'un système d'extraction à ressort ou à bras articulé (pour les grandes capacités de stockage). L'espace de stockage doit pouvoir être rempli et vidé aussi complètement que possible de manière simple. Les espaces morts doivent être aussi réduits que possible. Des systèmes d'aspiration pneumatiques sont utilisés pour les installations < 50 kW.

## 14.3.4 Systèmes de transport du combustible

**Transport pneumatique**
Le transport de poussière, plaquettes, plaquettes de bois secs et granulés peut s'effectuer de manière pneumatique ou mécanique. Dans les installations pneumatiques, le transport est assuré par des soufflantes, tandis que les installations mécaniques utilisent des convoyeurs à vis. Lorsque la configuration des lieux le permet, par exemple dans le cas de liaisons de transport courtes, les systèmes de transport mécaniques sont préférables aux systèmes pneumatiques. Les avantages du transport mécanique sont les suivants

- moins sujets aux pannes,
- nécessitent moins d'énergie d'entraînement et
- moins coûteux.

**Transport par vis sans fin**
Le domaine d'application du convoyeur à vis est limité aux dimensions maximales suivantes pour les combustibles:

- La longueur maximale du combustible correspond au diamètre de la vis sans fin.
- L'épaisseur maximale du combustible résulte du jeu entre le diamètre de la vis sans fin et le diamètre nominal du canal de transport ou le diamètre nominal du tube de guidage de la vis sans fin.

Les combustibles très souples qui peuvent s'enrouler autour de l'âme de la vis (par exemple, de longs morceaux d'écorce fraîche ou de longues plaquettes) peuvent poser des problèmes lors du transport par vis sans fin. Les combustibles ayant un mauvais comportement d'écoulement, tels que le bois d'entretien du paysage grossièrement broyé, peuvent causer des problèmes de transport aux points de transfert en formant des ponts.

**Convoyeur à chaîne à raclettes ou système de poussée**
Les combustibles de grande taille (très longs ou épais) ainsi que les combustibles présentant une mauvaise fluidité doivent être transportés à l'aide d'un convoyeur à chaîne à raclettes ou d'un système de poussée.

## 14.3.5 Alimentation de la chaudière

**Convoyeurs à vis**
Voir plus haut dans le chapitre « 14.3.3 » (Systèmes de transport du combustible). Les canaux à double vis sans fin de grand diamètre nominal permettent également le transport de combustibles longs avec un diamètre plus petit des vis sans fin individuelles.

**Poussoir hydraulique, systèmes à poussoir direct ou systèmes à poussoir**
Les poussoirs permettent de transporter des combustibles très longs, dont la longueur maximale peut atteindre 100 cm, dans la chambre de combustion.

Une arête de coupe supplémentaire sur le système de poussoir direct ou le système de poussoir peut couper les morceaux de combustible trop longs. Il est avantageux d'avoir deux arêtes de coupe séparées par une zone de décharge afin de réduire considérablement la consommation d'énergie électrique du groupe hydraulique du système de poussoir. L'écorce provenant du rotor perforé avec des morceaux d'écorce jusqu'à 80 cm peut être acheminée vers le foyer sans pré-broyage. Les déchets de bois contenant une forte proportion de matières étrangères (pierres, métaux, etc.) provoquent une usure importante du dispositif d'alimentation.

L'usure du dispositif d'alimentation lors de l'alimentation du foyer en bois usagé peut être considérablement réduite en séparant au préalable les matières étrangères.

**Remarque : risque de retour de flamme**

Afin d'éviter un retour de flamme dans le canal d'alimentation, la chaudière à bois doit fonctionner avec une réduction minimale et continue de la charge, ce qui permet une alimentation continue en combustible.

**Les valeurs indicatives suivantes s'appliquent pour une réduction minimale continue de la charge nécessaire :**

- Combustible humide > M40 : 20 % de la puissance nominale de la chaudière
- Combustible sec <M40 : 30 % de la puissance nominale de la chaudière.

Un fonctionnement à faible charge inférieur à la réduction minimale continue requise est exclu.

Les poussoirs sont principalement utilisés dans les chaudières à résidus de sciage avec écorce ou à bois provenant de l'entretien du paysage. Pour les plaquettes sèches et la poussière, les poussoirs doivent être équipés d'un clapet coupe-feu supplémentaire dans la goulotte, qui se ferme automatiquement en cas de panne de courant, en raison du risque de retour de flamme.

## 14.4 Sélection et dimensionnement du système de décendrage

La logistique des cendres pour la centrale thermique, qui vise à garantir une élimination des cendres nécessitant peu d'entretien, simple, conforme aux prescriptions et sans poussière, doit être définie en détail dès la phase de planification.

Le processus de combustion produit les fractions de cendres suivantes (Figure 9.1) :

- Cendres grossières (cendres de grille, cendres de chaudière, cendres de lit)
- Cendres volantes cycloniques (cendres cycloniques et cendres volantes)
- Cendres volantes fines (cendres de filtration).

**Stockage des cendres dans la centrale thermique**
Le stockage intermédiaire des cendres produites en vue de leur évacuation peut s'effectuer p. ex. dans des conteneurs à cendres ou des silos à cendres :

- Des conteneurs à cendres d'une capacité de 240 l, 400 l, 600 l, 800 l, 1'000 l sont par exemple disposés sous forme de « gare de conteneurs à cendres ».
- Une trémie à cendres sèche intégrée dans la structure de la centrale thermique (pas de stockage intermédiaire possible pour les gros morceaux de scories, transport des cendres à l'aide d'un véhicule équipé d'un système d'aspiration des cendres).

Autres possibilités de stockage des cendres :

- Bennes ou conteneurs spéciaux « roll on-roll off » dans la centrale thermique ou à l'extérieur
- Big bags.

**Dispositifs de transport des cendres**
Le transport des cendres grossières vers le conteneur ou le silo à cendres s'effectue à l'aide de systèmes d'évacuation mécaniques équipés de vis sans fin avec une inclinaison maximale de 45° sans reflux des cendres dans le canal de la vis, de barres de poussée, de chaînes à raclettes, de chaînes à auges, de convoyeurs à godets ou d'un système de décendrage humide avec convoyeur à chaînes à raclettes.

Le transport des cendres volantes cycloniques et des cendres volantes fines vers le conteneur ou la trémie à cendres peut être effectué à l'aide d'une vis sans fin avec une inclinaison maximale de 45° ou d'un système d'aspiration pneumatique des cendres, sachant que les dispositifs mécaniques de transport des cendres présentent les avantages suivants par rapport aux dispositifs pneumatiques:

- Moins de risques de dysfonctionnement (corps étrangers, morceaux de scories, particules incandescentes)
- Besoins en énergie auxiliaire réduits
- Émissions sonores réduites
- Pas d'usure des coudes de conduites.

En cas de cendres riches en scories ou contenant une forte proportion de corps étrangers tels que pierres, sable et autres, les vis sans fin sont soumises à une forte usure. Pour les longues distances de transport, il convient d'utiliser des convoyeurs à tiges poussoirs, à chaînes à raclettes, à chaînes à auges ou à godets.

Le trajet de transport du système d'évacuation des cendres vers le conteneur à cendres, la trémie à cendres ou depuis la centrale de chauffage vers la benne ou le conteneur « roll on-roll off » doit être étanche à la poussière et robuste, avec une configuration aussi courte et simple que possible (linéaire).

Une bonne accessibilité via des ouvertures de maintenance permet de remédier facilement aux dysfonctionnements et d'effectuer les travaux de maintenance sans difficulté.

Dans le cas des systèmes d'évacuation des cendres qui mènent à une benne ou à un conteneur « roll on-roll off » à l'extérieur, des mesures de protection contre le bruit doivent être prises pour réduire les nuisances sonores au niveau requis.

Des convoyeurs pneumatiques peuvent être utilisés lorsque la distance est longue ou que le trajet de transport est complexe. Il convient de noter que les systèmes pneumatiques ne peuvent être utilisés qu'avec des cendres exemptes de scories et sans impuretés, par exemple avec des électrofiltres ou des filtres à manches.

**Transport des cendres**
En fonction de la logistique d'élimination prévue (voir chapitre 9), il convient de décider si les différentes fractions de cendres doivent être stockées séparément ou ensemble. Il faut également tenir compte de la valorisation future de certaines fractions de cendres en prenant des dispositions pour une séparation ultérieure.

Dans les grandes installations dont la puissance de la chaudière à bois est supérieure à 2 MW, les cendres doivent être automatiquement transportées dans des bennes ou des conteneurs « roll on-roll off » pour camions. Le chargement du conteneur à cendres sur le véhicule de transport doit s'effectuer de manière simple. Un dispositif de changement simple (p. ex. des bennes coulissantes sur rails) vers le conteneur à cendres de remplacement permet de transporter les cendres sans effort (voir la Figure 14.7).




Figure 14.7 Dispositif de changement des bacs à cendres (source: AEE INTEC).

Dans le cas d'installations de chaudières à bois moyennes d'une puissance totale inférieure à 2 MW, les bacs à cendres doivent idéalement pouvoir être transportés directement de la centrale de chauffage à l'extérieur afin d'éviter l'utilisation d'équipements auxiliaires coûteux tels que des élévateurs hydrauliques pour conteneurs à cendres, des plates-formes élévatrices, des dispositifs de levage ou des convoyeurs pneumatiques.

Lors de la conception du système d'évacuation des cendres, il convient également de tenir compte de la facilité de chargement du conteneur à cendres sur un véhicule de transport et de la formation de poussière lors du vidage du conteneur à cendres dans un camion à ordures. Pour éviter la formation de poussière, un sac résistant à la déchirure et refermable peut être placé dans le conteneur vide et fermé avant le vidage. Les cendres sans braises peuvent être conditionnées dans des big bags jetables, transportées et mises en décharge.

Dans les installations de taille moyenne, le transport des cendres à l'aide d'un véhicule équipé d'un système d'aspiration des cendres (Figure 14.8) gagne en importance. Cela permet une manipulation aisée des cendres dans la centrale de chauffage. Le tuyau servant au transport des cendres de la centrale de chauffage vers l'extérieur (raccord du véhicule de transport) est généralement installé de manière fixe (tenir compte de la liaison équipotentielle).



Figure 14.8 Véhicule de transport équipé d'un système d'aspiration des cendres (source: Energie-bois Suisse).

# 15 Réalisation et réception de la chaudière à bois

## 15.1 Exigences générales et définition des principaux termes

La mise en œuvre et la réception de la distribution de chaleur sont décrites dans le manuel de planification du chauffage à distance [19]. La mise en œuvre et la réception de la chaudière à bois seront abordées ci-après. Les prescriptions en vigueur dans les Länder doivent être respectées ; elles peuvent, tout comme les accords contractuels spécifiques au projet, entraîner des divergences par rapport aux exigences et procédures présentées à titre d'exemple ci-après.

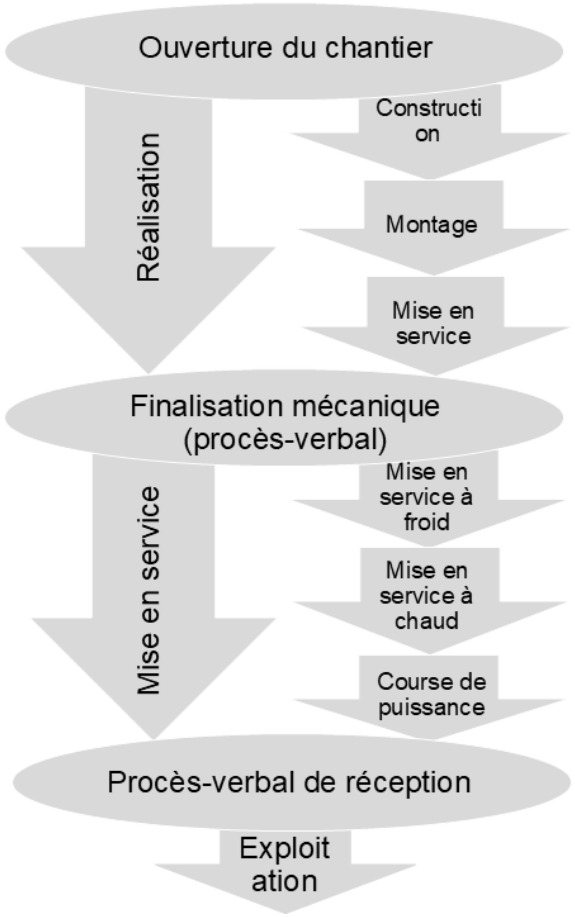



Figure 15.1 Construction, mise en service et exploitation d'une installation (créée par nos soins sur la base de [140]).

Figure 15.1 montre les phases habituelles d'un projet : construction, mise en service et exploitation. La **construction de l'installation**, c'est-à-dire la construction et le montage, commence avec l'ouverture du chantier. Ensuite, des contrôles de sécurité et de fonctionnement sont effectués. Ceux-ci peuvent être associés à la mise en service de l'infrastructure et des installations annexes et sont également appelés « mise en service » dans leur ensemble. La consignation de ce que l'on appelle l'achèvement mécanique marque la fin des préparatifs de mise en service, et l'on passe alors à la **mise en service** proprement dite. La mise en service à froid permet d'établir l'état de fonctionnement de manière à ce que l'installation puisse être démarrée. Lors de la mise en service à chaud qui suit, l'installation fonctionne pour la première fois dans des conditions d'exploitation. L'objectif de la phase d'essai qui suit est d'ajuster l'installation de manière à ce qu'elle atteigne les paramètres convenus et s'avère apte à fonctionner en continu. La preuve de performance avec des mesures de réception doit être fournie par le test de performance, également appelé essai de réception. Le test de performance se termine par la signature du **procès-verbal de réception** par les parties contractantes. L'installation passe alors en exploitation commerciale (fonctionnement continu) [140].

Avec la mise en service, chaque entreprise met en service sa partie de l'installation conformément au contrat d'entreprise. La mise en service des différentes parties de l'installation doit être effectuée conformément aux prescriptions générales en vigueur. Si plusieurs parties de l'installation doivent être mises en service simultanément, la surveillance des travaux (direction des travaux) doit coordonner le calendrier des différentes mises en service en concertation avec les différents entrepreneurs. Chaque entreprise est responsable de la mise en service de sa partie de l'installation.

Chaque partie de l'installation est réceptionnée individuellement conformément au contrat d'entreprise. La surveillance des travaux est responsable de la réception. Une fois la réception effectuée avec succès, la partie de l'installation réalisée par l'entreprise est remise au maître d'ouvrage.

La remise de l'ensemble de l'installation au maître d'ouvrage est terminée:

- lorsque toutes les parties de l'installation ont été réceptionnées conformément au contrat d'entreprise, que les défauts ont été corrigés et
- lorsque la surveillance des travaux a remis au maître d'ouvrage la documentation complète et mise à jour relative à l'ensemble de l'installation.

## 15.2 Surveillance des travaux

La surveillance des travaux, également appelée direction des travaux ou direction technique des travaux, doit être effectuée par une personne expérimentée et compétente. Il s'agit là de tâches qui incombent au maître d'ouvrage et qui doivent donc être organisées par celui-ci. En règle générale, la surveillance des travaux est confiée par le maître d'ouvrage au planificateur. Elle sert notamment à contrôler l'exécution des travaux dans les délais et dans les règles de l'art par les différents fournisseurs, ainsi qu'à coordonner l'ensemble du chantier. Il est recommandé de conclure des accords précis sur les mesures d'assurance qualité à mettre en œuvre par les fabricants et par la surveillance des travaux.

La surveillance des travaux doit organiser des réunions de chantier à intervalles d'une semaine au maximum, auxquelles doivent participer tous les fournisseurs d'installations travaillant sur le projet à ce moment-là. Ces réunions ont pour but de discuter de l'état d'avancement du projet,

des interfaces entre les différents fournisseurs d'installations, du calendrier et de toute autre question éventuelle. Des procès-verbaux de toutes les réunions doivent être rédigés et envoyés à toutes les parties concernées.

Le maître d'œuvre doit également demander en temps utile aux fournisseurs d'installations les données qui sont essentielles à l'exécution des travaux des autres fournisseurs d'installations.

La surveillance des travaux consiste notamment à vérifier que les travaux de montage effectués par les fournisseurs des installations sont conformes aux contrats d'entreprise. Cela vaut en particulier pour l'intégralité, la pose et l'exécution dans les règles de l'art, la sécurité au travail et la propreté. La qualité du montage, la documentation continue et les mesures d'assurance qualité des fabricants doivent être régulièrement contrôlées et documentées (par exemple, soudures, étanchéité, câblage, sens de rotation, montage conforme aux plans et aux schémas de flux).

La surveillance des travaux doit informer régulièrement le maître d'ouvrage de l'état d'avancement du projet.

## 15.3 Points critiques pendant la phase de construction

Ci-dessous sont présentés quelques exemples de points critiques pendant la phase de construction.

**Mise en place des éléments d'insertion du silo**

Les profilés d'ancrage et les rails de guidage pour l'extraction du silo doivent être posés dès le début de la phase de construction. En règle générale, l'ingénieur en statique établit les plans de coffrage et d'armature nécessaires à la construction du silo et y intègre les éléments statiques du système d'extraction. Le planificateur coordonne les livraisons des entreprises de construction et des fournisseurs d'installations et vérifie les plans du silo établis par l'ingénieur en statique.

Les pièces d'insertion du système d'extraction du silo sont posées par le fournisseur de l'installation. Il coordonne la date de montage avec l'entreprise de construction. C'est précisément pendant cette phase d'exécution exigeante que le planificateur ou la planificatrice doit garantir une bonne coordination entre l'entreprise de construction et le fournisseur de l'installation sur place.

**Détermination des passages de conduites**

Le planificateur doit communiquer à l'entreprise de construction, lors de la réalisation des fondations, les positions exactes des passages de conduites pour le chauffage à distance, les données, l'eau, les eaux usées, le téléphone, l'électricité et, le cas échéant, le mazout et le gaz, afin que les entrées de conduites ne soient pas positionnées à des endroits défavorables par la suite. Pour cela, il faut que la planification de la suite de ces conduites dans la chaufferie ait déjà été effectuée à ce stade.

**Prise en compte des bandes de mise à la terre pour la compensation de potentiel et la protection contre la foudre**

Toujours pendant la phase de fondation, il convient de convenir avec l'entreprise de construction de la pose de bandes de mise à la terre, de leur dérivation dans le sol et des possibilités de raccordement pour la compensation de potentiel des machines et la protection contre la foudre. Il arrive souvent qu'à ce stade, les travaux électriques ne soient pas encore attribués de manière définitive et que l'entreprise de construction doive donc effectuer ces travaux ou faire appel à une entreprise d'électricité pour les réaliser. En principe, il est recommandé d'inclure ces travaux dans l'appel d'offres pour les travaux de construction.

**Installation de grandes pièces**

L'installation de grandes pièces doit être planifiée en temps utile en fonction de l'avancement des travaux de construction. Si les portes et les portails ne présentent pas les dimensions intérieures nécessaires au montage, il convient de prévoir des ouvertures appropriées (par exemple, ouvertures dans le toit ou dans les murs). Une possibilité de montage inadaptée pour les éléments de l'installation pourrait entraîner des démontages partiels ou des découpes dans les murs, ce qui pourrait entraîner des retards et, dans tous les cas, des coûts imprévus pour le maître d'ouvrage.

**Installation d'aides au montage**

Souvent, les fournisseurs utilisent des aides au montage et des appareils de levage temporaires pour le montage d'éléments lourds de l'installation, par exemple des chariots élévateurs fixés au plafond. Ces équipements doivent être planifiés à temps, car ils peuvent avoir un impact sur la statique du bâtiment et doivent être pris en compte dans le dimensionnement.

Dans ce contexte, il convient également de toujours vérifier si les aides au montage et les appareils de levage peuvent être installés de manière permanente afin qu'ils soient également disponibles pour les travaux d'entretien et de maintenance ultérieurs.

## 15.4 Mise en service et démarrage

### 15.4.1 Préparatifs pour la mise en service, mise en service à froid

Après l'installation de la nouvelle installation, des préparatifs doivent être effectués dans le cadre de la mise en service [140]:

- Nettoyage de base,
- Contrôles de sécurité et de fonctionnement, contrôles d'étanchéité,
- Mise en service des installations annexes et de l'infrastructure.

Le contrôle du fonctionnement des différents composants de l'installation est généralement effectué par le fabricant de la chaudière, y compris tous les entraînements électriques et la technique de mesure, de commande et de régulation. Après la consignation de l'achèvement mécanique, on passe à la mise en service à froid, qui permet de rendre l'installation opérationnelle. La mise en service est indiquée par un protocole.

Dans la pratique, plusieurs aspects importants doivent être pris en compte lors des phases préparatoires des installations de chauffage au bois:

- La première mise en service d'une chaudière à bois nécessite un combustible sec afin que le revêtement réfractaire de la chambre de combustion puisse sécher complètement. Les exigences en matière de quantité et de qualité du combustible doivent être discutées avec le fournisseur de l'installation.
- Le silo à combustible doit d'abord être rempli au maximum à un tiers de sa capacité. En cas de problèmes avec le système d'extraction, il n'est pas nécessaire de vider tout le contenu du silo par l'ouverture de remplissage.
- Afin d'éviter la formation de ponts, il convient de prévoir suffisamment de temps pour le séchage du béton du silo avant le premier remplissage. Une phase de séchage de deux semaines est considérée comme le minimum. Avant le remplissage, le fournisseur de l'installation doit vérifier le fonctionnement et la conception du système d'extraction ainsi que la qualité de la surface du fond du silo. Il donne ensuite son accord à la direction des travaux pour le premier remplissage. Avant le remplissage, le silo doit être nettoyé à l'intérieur.
- Pour que l'installation de production de chaleur puisse être mise en service, il faut s'assurer qu'il y a une consommation de chaleur suffisante.
- Il incombe à la direction des travaux, en concertation avec les fournisseurs de l'installation, de coordonner la présence des différentes entreprises dans le temps.

**Liste de contrôle pour préparation mise en service**

- Système de chauffage et vase d'expansion remplis (évacuation de chaleur opérationnelle) ?
- La tuyauterie est-elle correctement installée ?
- La pompe de la chaudière est-elle en état de marche ?
- Les ventilateurs d'air de combustion et d'évacuation des gaz brûlés sont-ils en état de marche ?
- Maintien du retour en service ?
- Emplacement correct des sondes ?
- Le thermostat de sécurité est-il correctement réglé ?
- La soupape de sécurité est-elle montée ?
- Le dispositif de sécurité thermique est-il en état de marche ?
- Raccords de tuyauterie, dispositif anti-retour de flamme installés et prêts à fonctionner ?
- Le bon fonctionnement des raccordements électriques, y compris la chaîne de sécurité, a-t-il été vérifié ?
- Le système d'épuration des gaz de combustion, la cheminée et le raccordement de la cheminée sont-ils en bon état ?
- Fonctionnement des systèmes de transport (combustible, cendres) vérifié ?
- MSR, interfaces, communication, visualisation et, le cas échéant, enregistrement des données fonctionnels ?

### 15.4.2 Mise en service à chaud de l'installation

La mise en service à chaud de la chaudière, également appelée mise en service à chaud, nécessite le contrôle fonctionnel complet et la mise en service des composants de l'installation qui ne sont pas inclus dans la livraison du fournisseur de l'installation, mais qui sont nécessaires au fonctionnement de la chaudière. La mise en service à chaud de l'installation s'effectue lors du premier allumage de la chaudière à bois (démarrage), l'interaction simultanée de tous les composants de l'installation devant s'effectuer à l'aide du système de régulation automatique de l'installation. Tout d'abord, le revêtement de la chambre de combustion est séché conformément aux instructions du fabricant. La puissance de combustion est ensuite augmentée par paliers. Au cours de cette phase, les responsables de la surveillance des travaux, le personnel spécialisé chargé de la mise en service et le personnel qualifié de tous les corps de métier concernés (fabricant de chaudières, constructeur de l'installation, installateur, électricien, technicien de régulation) ainsi que le futur personnel d'exploitation doivent être présents ou disponibles à court terme. Le temps prévu pour cette phase doit être suffisamment long. Selon la taille de l'installation, il faut prévoir une journée entière, voire plusieurs jours. La mise en service à chaud est souvent appelée « essai de fonctionnement » [140].

Dans le domaine du chauffage et des centrales électriques, le fonctionnement d'essai peut également désigner une phase d'exploitation distincte entre la mise en service à chaud et le fonctionnement continu [140]. Dans le cas des chaudières à bois, elle peut commencer dès que

- L'installation peut fonctionner en mode automatique et en tenant compte de tous les tests de sécurité (par exemple, limiteur de température de sécurité, sécurité thermique de décharge) ;
- L'installation de chaudière a été réglée pour la mise en service d'essai et que le fonctionnement avec différents mélanges de combustibles a éventuellement été testé ;
- La première formation du personnel d'exploitation a été effectuée à l'aide du manuel d'utilisation.

Pendant la phase d'essai, qui peut durer de quelques jours à plusieurs jours, en fonction notamment de la taille et de la complexité de l'installation,

- L'installation est réglée de manière optimale,
- Les défauts importants doivent être corrigés,
- Et un fonctionnement ininterrompu et sans défaillance de l'installation doit être démontré sous la surveillance et la responsabilité du fournisseur de l'installation.

Les données d'exploitation doivent également être enregistrées et évaluées pendant la phase d'essai afin que les irrégularités dans le fonctionnement de l'installation puissent être détectées et résolues à temps avant la réception.

Les valeurs d'émission et de performance doivent être consignées dans un protocole de mesure et remises au maître d'ouvrage.

Si des dysfonctionnements surviennent qui obligent à arrêter l'installation et qui durent plus longtemps que ce qui est convenu dans le contrat d'entreprise, la phase d'essai recommence depuis le début après le dépannage. La phase d'essai recommence également depuis le début si la durée totale de tous les dysfonctionnements individuels dépasse la période convenue dans le contrat d'entreprise.

Le fournisseur de l'installation est responsable de la mise en service de la chaudière à bois et de la phase d'essai, car l'installation n'a pas encore été remise au maître d'ouvrage. Pour que le chauffage fonctionne sans problème, il est indispensable de désigner le personnel d'exploitation responsable, qui recevra les instructions nécessaires. Lors de la mise en service de l'installation, le personnel d'exploitation a l'occasion de se familiariser avec la chaudière à bois et il est important qu'il soit assisté par le fournisseur de l'installation et la direction des travaux. Cela comprend une formation préalable du personnel d'exploitation par le fournisseur de l'installation. La formation préalable doit être dispensée à l'aide du manuel d'utilisation.

**Contenu d'un manuel d'utilisation**

Fonctionnement de la chaudière à bois :

- Contrôles avant la mise en service et mise en service
- Positions des commutateurs et effets
- Modes de fonctionnement

Comportement en cas de dysfonctionnements :

- Concept en cas de dysfonctionnements et d'alarmes
- Comportement en cas de dysfonctionnements et liste des messages
- Tableau sous forme de protocole de signalisation des dysfonctionnements

Plan de maintenance :

- Intervalles de nettoyage et de décendrage
- Délimitation par rapport aux travaux de révision effectués par des tiers

Dispositifs de sécurité :

- Équipement technique de sécurité
- Règles de sécurité
- Prévention des accidents liés aux gaz de fermentation
- Prévention des accidents sur les installations de transport

Documentation :

- Schéma de l'installation
- Plans électriques
- Liste complète des équipements en texte clair

La plupart du temps, le manuel d'utilisation n'est pas encore disponible dans sa version définitive pendant la phase d'essai (schéma de révision manquant, plan de maintenance encore à l'état de projet, etc.). Il suffit toutefois de donner des instructions sur la base de ce projet. La transmission des informations porte principalement sur l'utilisation correcte des fonctions de commutation, le respect des consignes de sécurité et le comportement à adopter en cas de dysfonctionnements. Pendant la mise en service de l'installation, la direction des travaux doit s'assurer que le personnel d'exploitation a reçu toutes les instructions nécessaires du fournisseur de l'installation pour la phase d'essai qui va suivre. La première formation du personnel d'exploitation doit être consignée dans un procès-verbal qui doit être signé par la direction des travaux, le fournisseur de l'installation et le personnel d'exploitation.

## 15.5 Réception

La phase d'essai s'est déroulée avec succès et l'entreprise souhaite désormais remettre l'installation au maître d'ouvrage. Cette remise par l'entreprise ou réception par le maître d'ouvrage permet de vérifier la conformité de l'ouvrage avec le cahier des charges et les règles techniques.

La base de la remise est l'essai de performance, également appelé essai de réception. L'essai de performance a pour objectif de fournir une preuve de performance juridiquement contraignante de l'installation, qui doit être fournie dans le cadre de la mise en service pendant une période d'exploitation définie. Le programme correspondant est convenu contractuellement [140].

Le test de performance commence lorsque le fournisseur de l'installation a stabilisé et optimisé le fonctionnement de l'installation et du système de régulation de manière à ce qu'elle puisse être mise en service pour une exploitation continue sans perturbation. Le fournisseur de l'installation est responsable de la mise en service de la chaudière à bois, car celle-ci n'a pas encore été remise au maître d'ouvrage. Une fois la preuve apportée, des négociations de réception ont souvent lieu, qui se terminent par la signature du procès-verbal de réception. L'installation est alors en service commercial (fonctionnement continu) [140].

**Réglementations spécifiques à chaque pays**

En ce qui concerne la réception et sa documentation, il convient de respecter les lois, normes et réglementations nationales en vigueur ainsi que les accords contractuels spécifiques au projet. À cet égard, il convient également de se référer aux normes correspondantes en matière de contrats d'entreprise, qui régissent les questions de réception et de remise pour des travaux spécifiques. Il peut y avoir des divergences par rapport aux exigences et procédures exemplaires mentionnées ci-dessous, notamment en ce qui concerne les délais particuliers.

**Responsabilité, personnes participantes, déroulement**

La mise en service à froid et à chaud de la chaudière à bois incombe au fournisseur de l'installation et doit être terminée lors de la réception. La réception commune est toutefois dirigée par le maître d'œuvre. Doivent participer à la réception:

- la surveillance des travaux,
- le fournisseur de l'installation et
- le maître d'ouvrage.

Lors de la réception, l'étendue de la livraison et des prestations du fournisseur de l'installation est vérifiée sur la base du contrat d'entreprise.

Au moment de la réception, le fournisseur de l'installation doit notamment:

- remettre la documentation complète et mise à jour de l'installation, comprenant notamment le mode d'emploi, les schémas électriques révisés, les plans d'exécution révisés, les protocoles d'essai et la déclaration de conformité (voir guide Q, E.5) et
- instruire en détail le personnel d'exploitation de la chaudière à bois sur le fonctionnement et la maintenance de l'installation.

**Instruction du personnel d'exploitation de l'installation et documentation écrite relative à l'exploitation**

La formation du personnel d'exploitation est particulièrement importante pour les installations de chaudières à bois. Seules des installations exploitées et entretenues avec soin et de manière professionnelle peuvent atteindre un rendement élevé et de faibles émissions polluantes. Si p. ex. un combustible différent de celui utilisé lors du réglage est utilisé, le personnel d'exploitation doit savoir que le réglage de l'installation n'est plus optimal et doit être réajusté.

Un bon manuel d'utilisation, contenant également des informations sur le comportement à adopter en cas de dysfonctionnements et sur le réglage des valeurs de consigne, est indispensable pour une bonne maintenance de l'installation.

Les documents d'exploitation définitifs doivent être remis au plus tard lors de la réception. Les modifications apportées aux réglages de fonctionnement pendant la phase d'essai doivent être documentées et mises à jour. Souvent, les documents de révision et d'exploitation ne sont remis qu'après la réception. On oublie alors que la responsabilité est transférée au maître d'ouvrage dès que la réception finale a été effectuée avec succès. Cela peut entraîner des problèmes juridiques si le maître d'ouvrage peut prouver qu'il n'a pas été suffisamment préparé à sa tâche, ce qui est le cas en l'absence d'instructions d'exploitation claires.

Dans le cas des chaudières à bois automatiques, la chaîne de sécurité est plus étendue que dans le cas des installations de chauffage conventionnelles. Le manuel d'utilisation doit accorder une attention particulière à la prévention des accidents, par exemple dans la salle des silos ou au niveau des dispositifs de déchargement.

**Procès-verbal de réception**

Le contrôle et la réception conjoints ont pour objectif la rédaction d'un procès-verbal signé par toutes les parties, qui servira de preuve pour toutes les parties concernées. Le procès-verbal reprend tous les points du contrat d'entreprise relatifs à l'exécution du contrat.

Seuls les points particulièrement importants pour un chauffage au bois automatique sont énumérés ci-dessous:

- Contrôles de la livraison (type, contrôle des performances, dimensions, exhaustivité)
- Contrôle de l'exécution (fixations, isolation, qualité des matériaux, stabilité dimensionnelle)
- Contrôles de sécurité (dispositifs de sécurité, protection contre les retours de flamme, prévention des accidents)
- Contrôle des fonctions de commande (limite de livraison)
- Certificat d'émissions et de puissance
- Protocole de mise en service et d'essai

Le contrôle commun révèle souvent de petits défauts et des travaux partiels non tout à fait achevés. Il peut aboutir à trois décisions distinctes:

1. L'installation peut être réceptionnée.
2. L'installation peut être réceptionnée avec des réserves (légers défauts).
3. L'installation ne peut pas être réceptionnée (défauts importants).

La réception peut être refusée si des défauts importants sont constatés. Le maître d'ouvrage ou le maître d'œuvre doit accorder au fournisseur de l'installation un délai raisonnable pour y remédier. Une deuxième réception est ensuite organisée. Les éléments qui ont été jugés conformes au contrat dans le premier procès-verbal ne sont plus contrôlés lors de la deuxième réception.

La distinction entre les défauts mineurs et les défauts importants est déterminée par la pratique. Un défaut est en principe considéré comme important si le maître d'ouvrage a des raisons de le faire corriger le plus rapidement possible. Il s'agit notamment des défauts qui empêchent le bon fonctionnement ou la mise en service d'une installation, qui peuvent causer des dommages ou qui mettent en danger la vie ou la santé des personnes, les biens du maître d'ouvrage ou de tiers. Les défauts esthétiques ne sont pas considérés comme importants. Dans tous les cas, l'évaluation d'un défaut doit tenir compte de son impact sur l'ensemble de l'installation.

Si, lors du contrôle commun, certaines valeurs de garantie d'émission et de performance ne peuvent être prouvées, celles-ci doivent être consignées de manière précise dans le procès-verbal de contrôle en tant que réserves de performance.

**Remise de l'ouvrage au maître d'ouvrage**

Une fois la réception effectuée avec succès, l'ouvrage réalisé par le fournisseur de l'installation est remis au maître d'ouvrage. Lors de la remise de l'ouvrage au maître d'ouvrage, celui-ci doit assumer les obligations suivantes :

- Transfert de la surveillance: à partir du moment du transfert, il incombe au maître d'ouvrage de prendre toutes les mesures nécessaires pour protéger la vie et la santé des personnes, leurs biens et les biens de tiers. Ces obligations doivent être remplies par le fournisseur de l'installation jusqu'au moment du transfert.
- Transfert des risques: le fournisseur de l'installation n'assume plus aucun risque en cas d'accidents entraînant des dommages ou la perte de l'ouvrage.
- Début des délais de garantie et de prescription.
- Le fournisseur de l'installation doit remettre le décompte final dans un certain délai.

Ce n'est qu'après une réception sans défaut que le risque est transféré au donneur d'ordre. Le délai de garantie pour l'ensemble de la prestation commence à courir à partir du moment de la réception. Le transfert du risque ne commence qu'avec la réception partielle pour les parties autonomes de la prestation.

**Tâches du planificateur lors de la remise au maître d'ouvrage**

Les tâches suivantes doivent être accomplies par le planificateur lors de la remise de l'ensemble de l'installation au maître d'ouvrage:

- La documentation de l'installation conformément au guide qualité D.5 est remise dans son intégralité au maître d'ouvrage.
- Le concept d'optimisation de l'exploitation conformément au guide qualité D.6 est présenté au maître d'ouvrage

.

# Partie 4 – Exploitation et gestion

# 16 Optimisation de l'exploitation après la mise en service

## 16.1 Motifs et objectifs

Une fois la mise en service et la réception terminées avec succès (voir chapitre 15), l'installation construite, qu'il s'agisse d'une installation nouvellement construite ou d'une extension d'installation, passe en mode de fonctionnement normal et sous la responsabilité du propriétaire. L'expérience acquise lors de nombreuses inspections d'installations montre que, dans le cas d'installations de chauffage au bois et de réseaux de chaleur complexes, il n'est généralement pas possible d'atteindre un fonctionnement optimal, même si les installations ont été correctement conçues et construites et qu'une mise en service professionnelle avec essai de fonctionnement a été effectuée.

Les raisons en sont notamment les suivantes :

- L'incertitude de la planification due à la marge de fluctuation dans la détermination des besoins en chaleur
- La mise en service et les essais de fonctionnement ne peuvent pas refléter toutes les conditions de charge et d'exploitation qui surviennent au cours d'une année complète d'exploitation
- Le manque d'expérience en matière de comportement et de dynamique de régulation de l'installation
- Variations dans la gamme de combustibles et fluctuations de qualité (p. ex. teneur en eau).

De plus, il faut souvent plusieurs années avant que le réseau de chaleur atteigne le niveau d'extension final qui a servi de base à la planification et au dimensionnement de la production de chaleur. Si le niveau d'extension au moment de l'optimisation de l'exploitation diffère considérablement de l'extension finale, celle-ci doit être réalisée de manière appropriée et, dans la mesure du possible, conformément à la procédure décrite ici. En raison du développement dynamique d'un réseau de chaleur sur plusieurs années, il est d'autant plus important de mettre en place une surveillance continue des installations pendant leur exploitation et une optimisation continue de leur fonctionnement, et de répéter périodiquement la surveillance détaillée des installations en fonction de l'état d'extension.

Si les conditions d'exploitation sont relativement constantes tout au long de l'année en termes de courbe de charge, de qualité du combustible et autres, l'optimisation de l'exploitation peut être raccourcie et avoir lieu dès la mise en service et la phase d'essai. Il convient toutefois de s'assurer que les exigences suivantes en matière d'optimisation de l'exploitation peuvent être largement satisfaites. Cela pourrait être le cas p. ex. d'une centrale de chauffage au bois destinée uniquement à l'approvisionnement en chaleur industrielle et dont la part de charge dépendante du climat est secondaire.

Au cours de la mise en service et des essais de fonctionnement, un réglage de base de l'installation et de la régulation est effectué afin de permettre un fonctionnement stable et automatique. La régulation, en particulier, doit toutefois être optimisée sur la base des premières expériences d'exploitation. L'objectif de cette (première) optimisation de l'exploitation est d'atteindre un fonctionnement conforme à la planification, conformément à la description fonctionnelle, avec une efficacité maximale, de faibles émissions et des paramètres de fonctionnement stables, tels que les températures de départ. Cela inclut également un mode de fonctionnement aussi doux que possible afin d'obtenir des durées de vie (ou des durées de fonctionnement entre deux intervalles de nettoyage) aussi longues que possible et d'éviter les dysfonctionnements dus, par exemple, à la formation de scories, au dépassement ou au non-respect des limites de fonctionnement admissibles, etc. L'optimisation opérationnelle complète permet de réduire les coûts d'exploitation, de limiter l'impact environnemental et de prolonger la durée de vie de l'installation.

**Optimisation de l'exploitation avec QM Chauffages au bois**

Outre une planification professionnelle et consciencieuse, l'optimisation continue de l'exploitation est également un élément essentiel pour garantir le bon fonctionnement à long terme d'une installation. Comme cet aspect a souvent été négligé par le passé, l'optimisation de l'exploitation est désormais obligatoire dans le cadre du QM Chauffages au bois (voir chapitre 2).

Les conditions préalables, les responsabilités et les processus décrits dans les chapitres 0 à 16.4 correspondent pour l'essentiel aux spécifications du guide qualité [15]. QM Chauffages au bois propose les documents et outils suivants à cet effet :

- des descriptions fonctionnelles pour les solutions standards [62] et [71]
- listes de points de mesure
- Description de l'enregistrement des données
- Indicateurs prédéfinis
- Concept d'optimisation de l'exploitation - voir document suppl. 424 dans le guide qualité [15]
- FAQ 8: Comment l'évaluation et la présentation des données doivent-elles être effectuées dans le cadre de l'optimisation de l'exploitation ?

L'optimisation de l'exploitation présentée ici doit être considérée comme une exigence minimale et peut, selon les besoins, être réalisée de manière beaucoup plus détaillée et/ou étendue à d'autres composants de l'installation.

Dans le cadre d'une gestion rigoureuse, la collecte des données, la surveillance et les mesures d'optimisation qui en découlent doivent être poursuivies et documentées en permanence. Cela permet de créer une base de données et de connaissances qui sera très utile pour l'extension, la rénovation et la modernisation ultérieures de l'installation (voir chapitre 18).

L'optimisation de l'exploitation nécessite une évaluation et un contrôle systématiques du fonctionnement actuel de l'installation sur la base de données de mesure complètes et fiables, ainsi qu'une comparaison des données d'exploitation et des indicateurs avec les spécifications de la description fonctionnelle afin de répondre aux questions suivantes :

- L'installation fonctionne-t-elle comme prévu dans toutes les conditions de fonctionnement ?
- Les paramètres de régulation doivent-ils encore être ajustés ?
- Où y a-t-il encore des lacunes ou des questions en suspens ?
- Quand et comment les défauts existants peuvent-ils être corrigés ?
- Les valeurs garanties, qui ne peuvent être évaluées qu'après un fonctionnement à long terme, sont-elles respectées (consommation d'électricité, temps de trajet, etc.) ?

## 16.2 Conditions préalables et responsabilités

L'optimisation fondamentale du fonctionnement est réalisée dans les deux premières années suivant la réception de l'installation, en fonction de la taille de celle-ci. Pour les installations de chauffage à distance, cette optimisation doit être réalisée après au moins une année complète de fonctionnement ou une période de chauffage complète.

Une description fonctionnelle complète doit être établie au cours de la planification. Celle-ci sert notamment de base à la planification détaillée et à l'exécution, en particulier au raccordement hydraulique et à la régulation, mais elle est également une condition préalable fondamentale pour une optimisation réussie de l'exploitation. Au total, les documents suivants sont requis pour l'optimisation de l'exploitation :

- Schéma hydraulique complet et définitif
- Description détaillée du fonctionnement de l'installation pour tous les états de fonctionnement pertinents, y compris la description de la régulation
- Liste complète des points de mesure, indiquant pour chaque point la position de mesure, la plage de mesure, la résolution temporelle et la précision de mesure
- Description de l'enregistrement automatique des données avec documentation du principe de base, de la structure des données ou des fichiers, ainsi que du lieu et de la durée de stockage des données
- Liste des indicateurs convenus et garantis permettant de prouver le fonctionnement optimal
- Documentation et fiches techniques des principaux composants de l'installation

En outre, il convient de définir clairement les responsabilités en matière de préparation et d'exécution des travaux d'optimisation et de les inclure impérativement dans le mandat du planificateur principal et, le cas échéant, des autres mandataires responsables (par exemple, les entreprises de fabrication ou de régulation). Il est recommandé de répartir les principales responsabilités pour les activités requises comme suit, mais d'autres répartitions sont possibles en fonction de la situation:

- Planification et spécification de l'enregistrement des données par le planificateur
- Surveillance de l'enregistrement automatique des données par le personnel d'exploitation
- Réalisation d'enregistrements manuels complémentaires par le personnel d'exploitation
- Lecture et mise à disposition des données de mesure par le personnel d'exploitation de l'installation ainsi que par les entreprises de régulation ou les fabricants
- Évaluation, calcul des indicateurs et analyse des données par le planificateur ou la planificatrice.

Les activités dans le cadre de l'optimisation doivent être réalisées en étroite collaboration avec le personnel d'exploitation de l'installation et les fabricants.

Les responsabilités et les exigences relatives à la collecte des données et à la mise en œuvre de l'optimisation de l'exploitation doivent être résumées dans un concept d'optimisation de l'exploitation (voir document supplémentaire 424 dans le guide qualité [15].

Afin de garantir le succès de l'optimisation de l'exploitation en collaboration avec les fabricants, des garanties financières appropriées (retenues de garantie) doivent être prévues dans les contrats d'entreprise pour la durée de la garantie. Dans le cas contraire, il n'est pas possible de garantir que tous les fabricants participeront de manière ciblée à l'optimisation de l'exploitation.

## 16.3 Traitement et évaluation des données

Un équipement de mesure complet de la centrale thermique et du réseau de chaleur ainsi qu'une technologie de contrôle appropriée pour la transmission, le stockage et la visualisation des données d'exploitation mesurées constituent un outil important pour la gestion courante de l'exploitation et une base essentielle pour la mise en œuvre d'une optimisation de l'exploitation.

Le suivi comprend le traitement et l'évaluation des données d'exploitation. À cette fin, les **valeurs annuelles** essentielles pour l'année d'exploitation considérée et les indicateurs qui en découlent sont déterminés conformément au Tableau 16.1. Cela permet d'obtenir rapidement une vue d'ensemble du fonctionnement de l'installation et de comparer les indicateurs déterminés avec les valeurs prévues.

En outre, **des données d'exploitation** détaillées à haute résolution temporelle (par exemple, valeurs toutes les 5 minutes) sont nécessaires. Elles doivent être fournies à l'aide d'un équipement de mesure et d'un système de collecte de données appropriés (chapitre 5.10). Elles doivent être évaluées pour **des conditions de fonctionnement** et des périodes sélectionnées. À cette fin, les conditions de fonctionnement suivantes sont définies sur la base du QM Chauffages au bois (système de gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois):

- **Faible charge** proche de la limite de chauffage pendant la période de transition ou en été
- **Charge principale** comme plage de charge dans laquelle la majeure partie de la production de chaleur a lieu. La température extérieure se situe p. ex. dans une fourchette de 0 à 10 °C en moyenne journalière.

Dans les installations à plusieurs chaudières, le fonctionnement en cascade fait partie de la charge principale, mais aussi de la charge élevée.

- **Charge élevée** par temps très froid, lorsque la température extérieure moyenne journalière est inférieure à 0 °C, par exemple. Le fonctionnement en cascade dans les installations à plusieurs chaudières ainsi que le fonctionnement en charge de pointe avec une chaudière bivalente font également partie de la charge élevée.
- **Conditions de charge et de fonctionnement exceptionnelles**

Le choix des conditions de fonctionnement doit être adapté en fonction de la configuration de l'installation ou de la solution standard ([62] ou [71]) et d'autres facteurs d'influence, p. ex. s'il n'y a pas de fonctionnement en été.

Afin de pouvoir bien interpréter et évaluer ces données détaillées, une représentation graphique des données est indispensable et doit répondre aux exigences suivantes:

- Représentation d'un déroulement hebdomadaire représentatif pour chacun des états de fonctionnement définis
- Représentation du déroulement quotidien de jours sélectionnés
- Les données les plus importantes doivent pouvoir être représentées ensemble dans un seul diagramme.
- Les diagrammes doivent être facilement lisibles et comporter des légendes et des annotations sur les axes afin que les valeurs numériques puissent être facilement déchiffrées.
- La création et la transmission, par exemple sous forme de fichier Excel, facilitent l'analyse et l'interprétation des données.

Les exigences détaillées concernant les points de mesure à évaluer et les critères d'évaluation sont résumées dans le Tableau 16.2 et le Tableau 16.3. Ceux-ci contiennent également des recommandations sur la manière dont les différents paramètres peuvent être regroupés pour former des diagrammes journaliers et hebdomadaires pertinents. La présentation des diagrammes peut être adaptée si nécessaire aux questions à évaluer.

Certains systèmes de contrôle ou de visualisations d'installations offrent des possibilités étendues de création et d'exportation de graphiques chronologiques spécifiques à l'utilisateur, qui peuvent ensuite être utilisés directement pour l'évaluation et l'optimisation du fonctionnement.

Vous trouverez plus de détails et d'exemples dans la FAQ 8 de QM Chauffages au bois.

Tableau 16.1 Valeurs annuelles requises et indicateurs dérivés.

| | Paramètres | Unité | Évaluation |
|---|---|---|---|
| Pour toutes les chaudières à bois (HK) | Production annuelle de chaleur | MWh/a | Nombre d'heures à pleine charge HK |
| | Puissance nominale | kW | Valeur indicative solution standard |
| | Heures de fonctionnement totales | h/a | Nombre de démarrages par an |
| | 30 - 50 | | |
| | 50 - 75 | | |
| | 75 - 100 % | | |
| | Veille | h/a | |
| | Allumage/démarrage | h/a / n | |
| | Consommation électrique chaudière(s) à bois | kWh/a | Besoins spécifiques en électricité ch. bois |
| Condensation des gaz d'échappement (AK) | Production annuelle de chaleur | MWh/a | Nombre d'heures à pleine charge AK |
| | Puissance nominale | kW | Part de la condensation dans la production annuelle de chaleur des ch. à bois |
| | Heures de fonctionnement totales | h/a | |
| | Besoins en électricité pour la condensation | MWh/a | Besoins spécifiques en électricité AK |
| | Consommation d'eau | l/a | Consommation d'eau spécifique AK |
| Dispositif de séparation des poussières (séparateur électrique/filtre en tissu) | Heures de fonctionnement totales | h/a | Disponibilité |
| | Heures de fonctionnement du filtre actif | h/a | |
| | Heures de fonctionnement en dérivation | h/a | |
| | Disponibilité selon FAQ 38 | % | |
| | Heures de fonctionnement du chauffage actif | h/a | |
| | Heures de fonctionnement du filtre actif | h/a | |
| Pour toutes les chaudières bivalentes (BK) et autres sources de chaleur | Production annuelle de chaleur | MWh/a | Nombre d'heures à pleine charge BK |
| | Puissance nominale | kW | Part de la production annuelle |
| | Heures de fonctionnement totales | h/a | |
| | Besoins en électricité ch. bivalente/autres | MWh/a | Besoins spécifiques en électricité BK |
| Réseau de chaleur | Besoins annuels en chaleur départ centrale | MWh/a | Pertes du réseau |
| | Besoins annuels des consommateurs | MWh/a | ΔT en moyenne annuelle |
| | Quantité d'eau | $m^3$ /a | Pertes de l'accumulateur/de la centrale |
| | Besoins en électricité des pompes du réseau | MWh/a | Besoins spécifiques en électricité des pompes du réseau |
| Consommation de combustible et énergie auxiliaire | Plaquettes de bois, écorces, sciure, etc. | kg/a ($m^3$/a) | Taux d'utilisation de l'installation |
| | Granulés | $m^3$ /a | Rendement annuel de la ch. à granulés |
| | Fioul ou gaz | | Rendement annuel de la ch. bivalente |
| | Besoins en électricité d'une pompe à chaleur | | Rendement annuel de la pompe à chaleur |
| | Besoins en électricité de l'installation totale | | Besoins totaux spécifiques en électricité |

Tableau 16.2 Diagrammes, points de mesure et critères d'évaluation – Évolution hebdomadaire.

| Diagramme | Paramètre | Unité | Évaluation |
|---|---|---|---|
| Évolution hebdomadaire | Puissance réelle de la ch. à bois 1 | kW | Pertinence, sélection, déroulement de la journée |
| | Puissance réelle de la ch. à bois 2 | kW | Nombre de démarrages par jour/semaine |
| | Puissance réelle de la ch. bivalente | kW | Activation/désactivation de la chaudière bivalente |
| | Puissance réseau réelle | kW | Interaction avec d'autres sources de chaleur |
| | État de charge réelle de l'accu. | % | |
| | Température extérieure | °C | |

Tableau 16.3 Diagrammes, points de mesure et critères d'évaluation – Évolution quotidienne

| Diagramme | Paramètre | Unité | Évaluation |
|---|---|---|---|
| Aperçu | Température extérieure | °C | État de fonctionnement |
| | État de charge réel de l'accu.l | % | Régulation de l'état de charge de l'accumulateur |
| | État de charge souhaité de l'accu. | % | Activation/désactivation de la chaudière bivalente |
| | Puissance réelle de la ch. à bois 1 | kW | Interaction avec d'autres sources de chaleur |
| | Puissance réelle de la ch. à bois 2 | kW | |
| | Puissance réelle de la ch. bivalente | kW | |
| | Puissance autres sources chaleur | kW | |
| Pour chaque chaudière à bois | Température de sortie chaudière | °C | ΔT à la puissance nominale Puissance nominale |
| | Température d'entrée chaudière | °C | |
| | Puissance réelle chaudière à bois 1 | kW | Puissance minimale |
| | Puissance souhaitée ch. à bois 1 | kW, % | La puissance suit la demande sans oscillation ; puissance au niveau le plus bas possible |
| | Teneur résiduelle en oxygène / Lambda | % / – | Rendement de combustion |
| | Température gaz d'échappement | °C | Régulation de la température de sortie de la chaudière |
| | | | Nombre de démarrages par jour |
| | | | Respect des conditions de faible charge |
| | | | Production quotidienne minimale de chaleur |
| | | | Fonct. en été et remplacement des ch. à bois automne/printemps |
| Pour toutes les autres sources de chaleur (à l'exception des ch. bivalentes) | Puissance réelle | | |
| | Puissance souhaitée | | |
| | Température d'entrée | | |
| | Température de sortie | | |
| | Autres paramètres spécifiques (selon type de source de chaleur) | | Indicateurs spécifiques selon le type de source de chaleur |
| | | | Nombre de démarrages par jour |
| Diagramme supplémentaire | Temp. réelle de départ réseau | °C | Différence de température du réseau de chaleur |
| | Temp. réelle de retour réseau | °C | |
| | Puissance réseau réelle | kW | Ch. bivalente en service en cas de besoin, pics de charge du réseau |
| | Signal d'autorisation chaleur bivalente ou autres | kW, % | La puissance de la chaudière à bois reste maximale lors du fonctionnement de la chaudière bivalente |
| | Départ principal avant/après l'accu. | °C | Ordre d'utilisation prévu des autres sources de chaleur |
| | Retour principal avant/après l'accu. | °C | Puissance nominale |
| | | | Puissance minimale |
| | | | ΔT à la puissance nominale |
| | | | Régulation de la température de sortie de la chaudière |
| | | | La puissance suit la demande sans oscillation |
| | | | Puissance au niveau le plus bas possible |
| | | | Régulation de la température de sortie de la chaudière |
| Accumulateur | Température sonde accumulateur | °C | Stratification de la température Charge/décharge |
| | État de charge réel de l'accu. | % | Différence de température utile dans le réservoir T |

Paramètres supplémentaires requis :
- Valeur moyenne journalière [°C] pour le jour sélectionné
- Production quotidienne de chaleur [kWh/j] pour chaque générateur de chaleur
- Condition de charge minimale [kW ou % de la charge nominale] pour chaque chaudière à bois ou autre générateur de chaleur

## 16.4 Mise en œuvre

Une fois toutes les données d'exploitation préparées, l'analyse et l'évaluation proprement dites peuvent être effectuées et le fonctionnement réel de l'installation peut être comparé au fonctionnement défini dans la planification (fonctionnement théorique). Cette tâche incombe au planificateur principal. Dans le cadre de ce contrôle final, celui-ci doit documenter si l'installation fonctionne comme prévu. Pour ce faire, il convient de se baser sur tous les documents, données d'exploitation, indicateurs et diagrammes mentionnés précédemment, ainsi que sur les critères d'évaluation figurant dans le Tableau 16.1 jusqu'au Tableau 16.3. Il est en outre recommandé d'intégrer dans l'évaluation toutes les informations supplémentaires disponibles, telles que les mesures d'émissions récurrentes, le journal d'exploitation/rapports d'incidents, l'expérience du personnel d'exploitation et une visite de l'installation.

Lors de la mise en œuvre de l'optimisation de l'exploitation, il convient notamment de répondre aux questions suivantes:

- Les données de mesure disponibles sont-elles complètes et plausibles ou pourraient-elles comporter des erreurs de mesure ?
- Comparaison des valeurs prévisionnelles et réelles des besoins en chaleur de l'ensemble de l'installation et des différents clients dans le cadre d'une analyse des consommateurs (sur la base du tableau Excel « Relevé de situation »). En cas d'écarts importants, une analyse détaillée doit permettre de déterminer s'il s'agit d'une erreur systématique ou s'il existe d'autres raisons.
- L'efficacité de l'installation (rendement annuel de la production et du réseau) correspond-elle aux valeurs cibles prévues ?
- La chaudière à bois fournit-elle la puissance nominale convenue dans le contrat (de manière constante et sans fluctuations) ?
- La chaudière à bois fonctionne-t-elle à la puissance minimale convenue contractuellement sans interruption de l'alimentation en air de combustion ?
- La régulation de puissance en charge partielle fonctionne-t-elle de manière à ce que la ou les chaudières à bois fonctionnent toujours au niveau le plus bas possible, afin qu'elles puissent suivre lentement et sans oscillation l'évolution des besoins en puissance ?
- Les chaudières à mazout ou à gaz, le cas échéant, ne sont-elles activées que lorsque cela est absolument nécessaire ? Sont-elles à nouveau désactivées dès que la puissance requise peut être couverte par la chaudière à bois ? Les points de commutation (points de bivalence) correspondent-ils à l'hypothèse de la planification (tableau Excel Relevé de situation) ?
- Le fonctionnement estival est-il possible avec la (petite) chaudière à bois et quand faut-il passer de la petite à la grande chaudière à bois ou inversement en automne/au printemps ?
- La régulation du chargement de l'accumulateur fonctionne-t-elle conformément aux spécifications de la description et permet-elle un fonctionnement régulier des chaudières à bois ?
- La stratification de la température dans l'accumulateur est-elle maintenue pendant le chargement et le déchargement et la différence de température prévue est-elle atteinte ?
- Les démarrages et arrêts fréquents sont-ils largement évités ?
- Y a-t-il des conditions de fonctionnement qui entraînent des nuisances olfactives et des émissions élevées ?
- L'installation fonctionne-t-elle avec les valeurs d'oxygène résiduel et les températures des gaz d'échappement spécifiées ?
- Tous les combustibles spécifiés peuvent-ils être utilisés sans problème ?
- La combustion des cendres est-elle complète et aucun problème de scorification ne se produit-il ?
- Les températures mesurées correspondent-elles aux valeurs prévues et le comportement dans le temps est-il stable ?
- La température de départ principale du réseau de chaleur suit-elle la stratégie de régulation prévue (par exemple en fonction de la température extérieure) ?
- La température de retour principale correspond-elle aux valeurs attendues et où existe-t-il un potentiel d'optimisation (une analyse des consommateurs peut être effectuée à cet effet conformément au manuel de planification du chauffage à distance [19]).
- La disponibilité de l'électrofiltre, le cas échéant, correspond-elle aux spécifications ou aux valeurs garanties ? (voir FAQ 38)
- La consommation électrique spécifique correspond-elle aux valeurs prévues ou aux indications du fabricant ?
- La durée de fonctionnement garantie entre les nettoyages manuels de la chaudière est-elle atteinte ?
- Les intervalles d'entretien ne sont-ils pas plus courts que ceux garantis ?
- Les pannes sont-elles fréquentes sur certains composants ?
- Les composants de l'installation présentent-ils une usure accrue (p. ex. chamotte dans le foyer, éléments de la grille) ?

Si cette évaluation révèle des défauts dans le fonctionnement et l'exploitation des installations, des mesures d'optimisation appropriées doivent être définies. Celles-ci concernent généralement l'ajustement progressif des paramètres de régulation tout en observant les effets.

Lors de l'ajustement des paramètres de régulation, il convient de veiller à ne modifier qu'un seul paramètre à la fois et de prévoir suffisamment de temps pour en observer les effets. Le système de combustion du bois réagit très lentement aux ajustements des paramètres et il faut compter plusieurs heures, voire plusieurs jours, pour que les effets se manifestent. Tous les ajustements doivent être consignés en détail dans un journal d'exploitation. La documentation doit être établie de manière à ce que toutes les personnes impliquées dans le projet puissent ultérieurement consulter et comprendre les modifications.

Si nécessaire, il convient de faire appel à des experts en régulation et aux fabricants. Les défauts graves doivent être immédiatement signalés par écrit au fabricant dans le

cadre de la garantie. Si des défauts de sécurité de quelque nature que ce soit sont détectés au cours de l'optimisation de l'exploitation, les personnes compétentes (notamment les planificateurs) ont l'obligation d'en informer les responsables des installations et doivent immédiatement signaler les défauts correspondants par écrit.

Le personnel d'exploitation responsable doit être impliqué autant que possible dans l'évaluation et l'optimisation. L'optimisation de l'exploitation a également pour objectif de mettre en place une surveillance des installations pendant leur fonctionnement et une optimisation continue de l'exploitation.

# 17 Exploitation et maintenance

## 17.1 Organisation de l'exploitation

Une centrale de chauffage au bois avec réseau de chaleur est une entreprise comme les autres. Les mêmes exigences s'appliquent donc en matière de gestion administrative et commerciale professionnelle.

La direction est responsable des tâches suivantes dans le domaine administratif et commercial :

- Communication des principales prescriptions, directives et lois au personnel d'exploitation
- Information du personnel d'exploitation sur les dispositions importantes pour lui dans les contrats de fourniture de chaleur et dans le contrat de fourniture de combustible
- Conclusion de contrats conformes à la loi (contrat de livraison de combustible, contrats de fourniture de chaleur, etc.)
- Identification et mise en œuvre des potentiels d'optimisation dans les domaines suivants :
  - Achat bien organisé de combustible et d'électricité (pooling d'électricité)
  - Assurances
  - Affectation du personnel/location de personnel
  - Logistique des combustibles à faible coût, réduction de la manipulation des combustibles et de l'utilisation de véhicules (location éventuelle d'équipements tels que des chargeuses sur pneus ou utilisation en synergie, par exemple avec la commune).
- Coopération avec des associations d'exploitants et/ou d'autres centrales de chauffage (par exemple, groupements d'achat, gestion commune des pièces de rechange)
- Service clientèle professionnel (communication avec les clients, information, service, hotline, etc.)

En ce qui concerne le bon fonctionnement technique, les remarques suivantes relatives à l'organisation de l'exploitation doivent être prises en compte.

Une exploitation ordonnée nécessite une organisation opérationnelle comprenant une liste des personnes impliquées, de leurs responsabilités et de leurs compétences. Une documentation complète et actualisée de l'installation, conforme au guide qualité QM Chauffages au bois « E.5 Exigences qualité Documentation de l'installation » [15], permet au personnel d'exploitation d'utiliser et d'entretenir à tout moment la centrale de chauffage au bois avec réseau de chaleur à l'aide des données actuelles de l'installation.

Toutes les lois et directives applicables, en particulier les conditions stipulées dans l'autorisation d'exploitation de l'installation, doivent être prises en compte dans l'exploitation courante de l'installation. Cela concerne notamment les domaines suivants :

- Protection contre les incendies
- Sécurité au travail/équipement de protection
- Protection contre les explosions
- Contrôles périodiques

Des plans d'urgence doivent être élaborés pour les scénarios suivants :

- Alimentation de secours/garantie de l'approvisionnement en chaleur en cas de panne totale de la production
- Où puis-je me procurer un chauffage d'urgence mobile et combien de temps cela prend-il ?
- Procédure en cas de panne de courant et vérification de la nécessité d'une alimentation électrique de secours.
- Procédure à suivre en cas d'accès limité à la centrale de chauffage (par exemple en hiver, dans les régions montagneuses) en ce qui concerne l'approvisionnement en combustible, les moyens d'exploitation et le personnel.
- Quelles pièces de rechange essentielles doivent être disponibles sur place pour éviter des interruptions de service prolongées ?

## 17.2 Fonctionnement technique

Les conditions préalables les plus importantes pour le bon fonctionnement d'une centrale de chauffage au bois sont les suivantes :

- L'utilisation de types de bois-énergie adaptés à la chaudière à bois et pour lesquels elle a été réglée. La qualité du combustible doit correspondre à la définition du combustible selon le contrat d'entreprise conclu avec le fournisseur de l'installation.
- Surveillance régulière des données d'exploitation telles que la température des gaz d'échappement, l'excès d'air, la vitesse du ventilateur d'échappement, les temps de fonctionnement, etc.
- Contrôle régulier de l'installation afin, par exemple, de détecter à temps les fuites des conduites hydrauliques ou d'éliminer les morceaux de combustible trop gros.
- Entretien régulier de l'installation conformément aux instructions du fabricant.
- Cahier des charges détaillé pour le personnel d'exploitation avec description des tâches, responsabilités et autorisations pour les différents domaines d'activité.

**La procédure à suivre en cas de dysfonctionnement** est décrite dans le manuel d'utilisation du fabricant. Le personnel d'exploitation doit être spécialement préparé aux incidents majeurs (panne de courant, panne d'une chaudière à bois, interruption de l'approvisionnement en combustible, etc.) afin de pouvoir réagir rapidement en cas d'urgence. La compréhension des dysfonctionnements et la connaissance des moyens de les résoudre permettent d'exclure à l'avance une partie des difficultés.

## 17.3 Maintenance

### 17.3.1 Généralités

La maintenance comprend l'entretien, l'inspection (surveillance), la réparation (maintenance) et l'amélioration de la technologie des installations.

Les objectifs de la maintenance sont un fonctionnement sans défaillance, un mode d'exploitation optimal et respectueux de l'environnement, un taux d'utilisation annuel

élevé ainsi que le maintien de la valeur des installations et des composants à moindre effort et à moindre coût.

La tenue d'un journal d'exploitation permet de retracer à tout moment l'historique des principales étapes de maintenance. Cela sert de base à la coordination et à la planification des mesures de maintenance nécessaires.

Une maintenance préventive et basée sur l'état comprend, entre autres, des mesures de l'épaisseur des parois et de l'usure aux endroits critiques (par exemple, conduites de chaudière, réfractaires, grilles/éléments de grille, groupes de transport, pompes, ventilateurs) ainsi que le contrôle des dispositifs d'alerte de fuite et de sécurité, le maintien de la pression (quantités de réalimentation) et le contrôle régulier de la qualité du caloporteur. Cela permet d'augmenter la durée de vie de l'installation et de réduire les coûts de réparation et de maintenance à long terme.

La rentabilité de l'exploitation d'une centrale de chauffage au bois avec réseau de chaleur est fortement influencée par les coûts d'entretien et doit être prise en compte dès la phase de planification (voir également le chapitre 3).

La part de la maintenance est souvent rapportée aux coûts d'investissement. Dans la Figure 17.1, les coûts de maintenance représentent 4 % des coûts d'investissement de la production de chaleur. Vous trouverez de plus amples informations à ce sujet au chapitre 10.3.

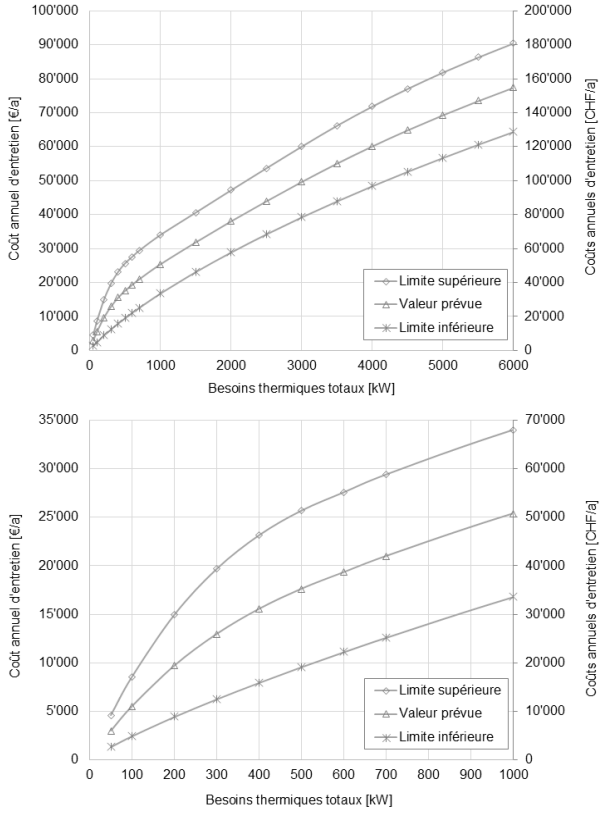



Figure 17.1 Coûts annuels de maintenance en fonction des besoins thermiques totaux de l'installation (valeur empirique = 4 % des coûts d'investissement selon Figure 10.8).
En haut : plage jusqu'à 6'000 kW
En bas : plage jusqu'à 1'000 kW.

## 17.3.2 Maintenance et inspection

La maintenance et l'inspection comprennent la surveillance du fonctionnement, y compris le contrôle de la disponibilité du séparateur de particules, le dépannage, les travaux de maintenance tels que le nettoyage ou la lubrification, le contrôle régulier du fonctionnement des composants de l'installation et la maintenance périodique par les fabricants des différents composants de l'installation. À cette fin, il existe un contrat de maintenance pour la chaudière à bois ou le filtre, ainsi qu'un nettoyage périodique de la chaudière et de la cheminée par un ramoneur. Outre l'inspection courante, tous les contrôles périodiques prescrits par la loi doivent également être effectués et documentés (par exemple, dispositifs anti-retour de flamme, appareils de levage, portes automatiques, véhicules, équipements de protection contre l'incendie et d'extinction, éclairage de secours, etc.). Dans la mesure où cela n'est pas autorisé sous forme d'autocontrôles, des organismes certifiés doivent être mandatés à cet effet.

La part consacrée à la maintenance et à l'inspection s'élève, à titre indicatif, à 2 % des coûts d'investissement dans la production de chaleur et représente ainsi la moitié des coûts de maintenance totaux, conformément à la Figure 17.1. Vous trouverez de plus amples informations à ce sujet au Chapitre 10.3.

**Fonctionnement nécessitant peu d'entretien**
Afin qu'une chaudière à bois puisse fonctionner sans panne et nécessite peu d'entretien, les efforts nécessaires au nettoyage de la chaudière doivent être réduits au minimum.

Pour cela, un nettoyage automatique des tubes de chaudière et une évacuation automatique des cendres de la chambre de combustion sont nécessaires.

**Nettoyage de la chaudière**
Les cendres et les matières étrangères résultant du processus de combustion se déposent aux endroits suivants, qui doivent être nettoyés périodiquement par le personnel d'exploitation ou le ramoneur :

- Conduits d'échange thermique de la chaudière ou de l'échangeur thermique en aval (cendres volantes) et leurs chambres de déviation
- Zone de combustion
- Chambre de combustion (cendres de grille), autour de la cornue de combustion dans les foyers à alimentation par le bas, à l'extrémité de la grille dans les foyers à grille
- Sous la grille (cendres de grille) ou sous la cornue de combustion

Les documents d'exploitation du fournisseur de la chaudière décrivent le nettoyage de la chaudière et précisent la fréquence à laquelle un nettoyage est nécessaire. L'intervalle de nettoyage dépend du combustible, du comportement de combustion du combustible sur la grille (lit de combustion stable sans percées ni points chauds), du mode de fonctionnement de l'installation et de l'état de fonctionnement de l'installation.

La température des gaz d'échappement est un bon indicateur de l'état d'encrassement de l'installation et doit donc être contrôlée régulièrement. Les surfaces d'échange thermique encrassées nuisent au transfert de chaleur vers l'eau de chauffage. Il en résulte une augmentation de la température des gaz d'échappement et donc des pertes de gaz d'échappement plus importantes. Par rapport à l'état de la chaudière nettoyée et à puissance de combustion égale, un nettoyage de la chaudière est nécessaire lorsque la température des gaz d'échappement augmente de 20 K à 30 K. En règle générale, l'intervalle est de deux à trois semaines.

Grâce à un nettoyage pneumatique ou mécanique automatique des tubes de chaudière, l'intervalle entre deux nettoyages manuels de la chaudière peut être porté à 2'500 – 3'000 h/a d'heures de fonctionnement à pleine charge, soit un intervalle semestriel (voir également le chapitre 5.5).

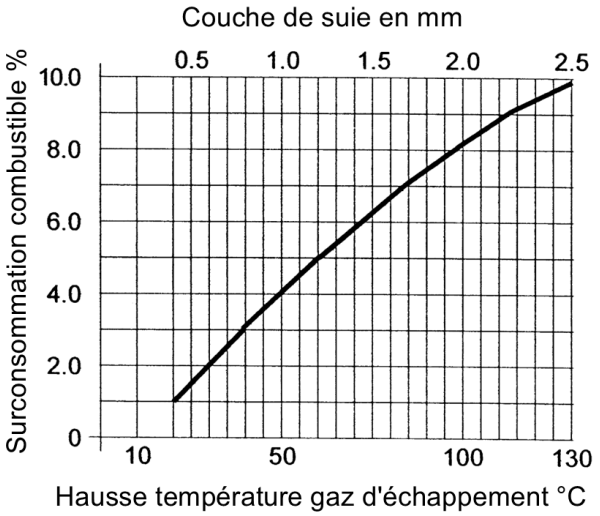



Figure 17.2 Lien entre la couche de suie sur les échangeurs thermiques, la surconsommation de combustible et l'augmentation de la température des gaz d'échappement dans la chaudière.

Les pièces automatiques suivantes permettent de réduire considérablement les efforts de nettoyage supplémentaires :

- Evacuation des cendres sous grille pour les foyers à grille
- Evacuation des cendres proches du foyer pour les foyers volcan et les foyers à grille

**Contrat de maintenance (contrat de service)**
Le contrat de maintenance (contrat de service) prévoit la maintenance périodique des composants de l'installation par le fournisseur de l'installation.

La maintenance périodique doit permettre un fonctionnement sans défaillance, qui n'entraîne aucun dommage aux composants de l'installation. Le bon fonctionnement technique doit être assuré par le remplacement des pièces d'usure.

**Étendue du contrat de maintenance pour une chaudière à bois automatique**
Au moins les travaux de maintenance suivants doivent être effectués sur une chaudière à bois automatique dans un intervalle de deux ans (voir également le chapitre 5):

- **Révision**: lors de la révision, les composants de l'installation sont contrôlés à l'arrêt de l'installation, par exemple en été, afin de vérifier l'usure et le bon fonctionnement du système de transport, de la chambre de combustion, de la grille, de la chaudière et des dispositifs de sécurité.
- **Maintenance des émissions**: lors de la maintenance des émissions, le bon fonctionnement de l'installation en service est contrôlé en termes de qualité de combustion et de rendement de combustion, de commande, de dispositifs de sécurité tels que la protection contre le retour de flamme ou le thermostat de sécurité. Il peut être nécessaire de définir de nouvelles valeurs de réglage pour la régulation de la combustion.

Une maintenance à distance supplémentaire par le fabricant du système de combustion est une aide importante pour le personnel d'exploitation dans le dépannage et l'optimisation du fonctionnement. Elle comprend les activités suivantes :

- Diagnostic à distance
- Contrôle
- Accès à distance et conseil par téléphone
- Télécommande/commande à distance

Un contrat de maintenance garantit la continuité de ce travail. De cette manière, les dysfonctionnements peuvent être réduits au minimum ou résolus immédiatement à distance grâce à la maintenance à distance. La sécurité de fonctionnement est ainsi renforcée. Vous trouverez de plus amples informations dans les chapitres 5.10 et 16.

**Partenaires contractuels**
En fonction de la taille et de la complexité de l'installation ainsi que du nombre d'entrepreneurs principaux, plusieurs contrats de maintenance peuvent être nécessaires pour l'installation de chauffage au bois. Les partenaires contractuels possibles sont :

- Fabricant de la chaudière à bois avec commande
- Fabricant des silos (remplissage et vidage du silo)
- Fabricant du système de traitement des gaz
- Fabricant de l'intégration hydraulique
- Fabricant du système de régulation ou de contrôle
- Entreprises spécialisées indépendantes des produits.

Dans certains cas, un contrat de maintenance doit être conclu avec toutes les entreprises mentionnées ci-dessus. Les prestations incluses dans les contrats de maintenance respectifs doivent être coordonnées entre elles.

**Contenu du contrat**
Un contrat de service doit contenir les points suivants:

- Objet
- Description claire des limites de prestations et des services (garanties possibles également !)
- Description des exclusions et des exceptions
- Indication des taux horaires, indemnités et frais
- Coûts
- Validité et durée
- Résiliation
- Prolongation
- Adresse de contact et organisation pour la demande de prestations de service en cas d'urgence
- Obligations de l'exploitant
- Droits de l'entrepreneur

### 17.3.3 Réparation et amélioration

Le renouvellement périodique de composants de l'installation tels que le revêtement réfractaire de la chambre de combustion, les grilles ou les pompes avec un niveau technique identique relève de la réparation. En revanche, le remplacement de composants de l'installation par des composants d'un niveau technique plus récent correspond à une amélioration.

La part consacrée à la réparation et à l'amélioration s'élève, à titre indicatif, à 2 % des coûts d'investissement dans la production de chaleur et représente ainsi la moitié des coûts d'entretien totaux, conformément à la Figure 17.1. Le chapitre 10.3 livre encore plus d'informations à ce sujet.

## 17.4 Sécurité au travail

La sécurité au travail du personnel d'exploitation est essentiellement déterminée par le respect et la conformité aux exigences spécifiques du pays en matière d'équipements de sécurité des parties correspondantes de l'installation en ce qui concerne la protection contre les incendies, la prévention des accidents et la protection contre les explosions (voir également le chapitre 19).

En outre, une grande attention doit être accordée à l'hygiène au travail, car elle a une grande influence sur l'état de santé du personnel d'exploitation. Le personnel d'exploitation d'une centrale de chauffage au bois est exposé aux émissions et influences suivantes, qui ont une incidence sur la santé:

- Poussière de cendres lors du nettoyage de la chaudière, de la manipulation des cendres, des travaux d'entretien sur le système d'échappement et le système de décendrage
- Poussière de bois dans le dépôt de combustible lors de la livraison, de la manutention et des travaux de maintenance du système de transport du combustible
- Moisissures dans le dépôt de combustible lors de la livraison, de la manutention et des travaux de maintenance sur le système de transport du combustible
- Bruit
- Gaz de fermentation dans le dépôt de combustible et dans les locaux adjacents
- Monoxyde de carbone dans le stockage des granulés
- Pièces de l'installation à haute température ou à rayonnement thermique élevé.

La poussière de cendres, la poussière de bois et les spores de moisissures contiennent des particules fines qui peuvent pénétrer dans les poumons et nuire à leur fonction. La poussière de bois et les spores de moisissures peuvent provoquer des allergies qui peuvent affaiblir l'état de santé de la personne concernée. Le personnel d'exploitation doit prendre les précautions suivantes :

- Porter un masque de protection en cas d'exposition à des émissions de poussière de cendres, de poussière de bois et de spores de moisissures.
- Prendre des mesures de protection contre le bruit en cas de niveau sonore élevé.
- Bien aérer les entrepôts de combustible et les locaux présentant une concentration potentiellement élevée de gaz de fermentation avant d'y pénétrer afin d'éviter tout risque d'asphyxie.
- Respecter les consignes de sécurité figurant dans la brochure sur le stockage des granulés de bois [67] avant de pénétrer dans les entrepôts de granulés afin d'éviter tout accident corporel dû à des concentrations toxiques de CO.
- Le port de vêtements de protection appropriés avec écran de protection lors de la manipulation de pièces de l'installation ou lors de travaux à proximité immédiate de pièces de l'installation présentant des températures élevées, afin d'éviter toute brûlure corporelle.
- Mise hors tension ou interruption de l'alimentation électrique lors du dépannage ou des travaux de maintenance sur des composants de l'installation équipés d'entraînements électriques.

## 17.5 Assurances

Pour garantir le fonctionnement économique à long terme d'une centrale de chauffage au bois, il est indispensable de souscrire les assurances appropriées. Cela revêt une importance particulière dans la mesure où des contrats de fourniture de chaleur ont généralement été conclus avec les clients. Aucune centrale de chauffage ne peut garantir qu'aucun dysfonctionnement ou interruption imprévu ne viendra perturber la fourniture de chaleur ou la rendre non rentable. Les assurances suivantes peuvent être envisagées :

- Construction (pendant la phase de construction)
- Incendie
- Incendie-Interruption d'exploitation
- Bris de machines
- Brûlure de machines - interruption d'exploitation
- Responsabilité civile d'entreprise
- Dommages naturels

Il est recommandé de procéder à une évaluation précise des risques en collaboration avec des experts.

Les points d'assurance supplémentaires sont les suivants:

- Couverture des frais accessoires en cas de sinistre
- Couverture des frais d'expertise en cas de sinistre
- Protection juridique
- Conduites

Il est recommandé de vérifier si un contrat-cadre d'assurance pour les centrales de chauffage au bois avec réseau de chaleur peut être conclu avec la couverture suivante (si elle n'est pas déjà incluse dans d'autres assurances) :

- Assurance bâtiment (généralement obligatoire)
- Assurance contenu
- Assurance perte d'exploitation
- Assurance perte d'exploitation pour frais supplémentaires
- Assurance responsabilité civile
- Assurance protection pénale spéciale

Les dispositions des contrats d'assurance doivent être strictement respectées. Outre toutes les prescriptions légales (en particulier les contrôles périodiques et la documentation – chapitre 17.3.2), il convient également de respecter les exigences supplémentaires éventuellement imposées par les assurances afin de garantir la couverture d'assurance.

# 18 Optimisation et rénovation des installations existantes

## 18.1 Explications

Les nouvelles installations planifiées et réalisées dans le cadre du programme QM Chauffages au bois procèdent, au cours des premières années d'exploitation, à **l'optimisation** décrite au chapitre 16. Il s'agit de vérifier si l'installation, dans l'état actuel du réseau de chaleur, atteint les objectifs techniques et économiques du programme QM Chauffages au bois. Si l'installation est construite conformément à ces spécifications et objectifs, les données d'exploitation nécessaires à cette évaluation sont disponibles.

Le présent chapitre est destiné aux installations existantes qui sont en service depuis plusieurs années, qu'elles aient été accompagnées ou non par QM Chauffages au bois. Afin que les installations existantes restent viables dans un environnement économique, technique et énergétique en constante évolution, les principaux composants des installations de production et de distribution de chaleur doivent être contrôlés périodiquement sur le plan technique et économique, et les potentiels d'optimisation doivent être identifiés et exploités. Densification ou extension de l'approvisionnement en chaleur, les innovations techniques, les nouvelles dispositions légales telles que le renforcement des valeurs limites d'émission ou l'interdiction ou la baisse d'acceptation des combustibles fossiles, l'usure importante des composants de l'installation, la multiplication des problèmes de fonctionnement ou des pannes de l'installation ou encore les nouveaux rapports de propriété peuvent déclencher un contrôle approfondi (**analyse du statu quo**) de l'installation. Celui-ci peut aboutir à la conclusion que certaines parties doivent être optimisées (**optimisation des installations existantes**) ou que certaines parties de l'installation ou l'ensemble de l'installation doivent être renouvelés (**renouvellement des installations existantes**).

Les chapitres suivants décrivent les procédures, les outils et les mesures à mettre en œuvre et ont pour but de montrer aux planificateurs comment ils peuvent aider le personnel d'exploitation à optimiser et/ou à renouveler l'installation. Le point de départ est toujours une analyse du statu quo conformément au chapitre 18.2.2 qui doit être complétée par une analyse du renouvellement de l'installation conformément au chapitre 18.3.2.

## 18.2 Optimisation des installations existantes

### 18.2.1 Procédure

Les étapes suivantes sont nécessaires pour optimiser les installations existantes :

- Analyse de la situation actuelle de la technologie existante et de la situation économique actuelle
- Évaluation des résultats de l'analyse du statu quo, si possible à l'aide d'une comparaison par rapport à des références
- Présentation des mesures d'optimisation avec analyse coûts/bénéfices, si nécessaire réalisation d'études approfondies dans certains domaines.
- Mise en œuvre des mesures d'optimisation et contrôle des résultats.

L'optimisation doit être réalisée par des experts expérimentés. Afin d'obtenir des résultats fiables et pertinents, une bonne collaboration avec le personnel d'exploitation est nécessaire. Ce dernier doit fournir les informations requises. Si des lacunes en matière de sécurité sont constatées, elles doivent être signalées aux responsables de l'installation afin qu'elles puissent être immédiatement consignées par écrit.

### 18.2.2 Analyse de la situation actuelle sur les plans technique et économique

Toute analyse repose sur une base de données actuelle et complète et sur une estimation de l'évolution future. Les données et informations suivantes doivent donc être obtenues de manière aussi complète que possible pour l'analyse du statu quo.

**État général de l'installation**
Pour l'évaluation, il est nécessaire de disposer d'une description de l'état général de l'installation, de l'état de la technologie et de l'équipement de l'installation, d'une description générale de la situation actuelle et des problèmes éventuels, dans la mesure où ceux-ci ne sont pas détaillés dans les points suivants, ainsi que des plans d'extension actuels ou futurs pertinents. Une visite de l'installation permet d'avoir une vue d'ensemble de l'état actuel.

**Production de chaleur**

- Description des générateurs de chaleur
- Année de construction et état général, puissances nominales, composants supplémentaires (séparateurs de particules fines, économiseurs, etc.), mesures des émissions, protocoles des dysfonctionnements et des réparations
- Données de base et données annuelles nécessaires pour le tableau Excel relevé de situation (voir chapitre 11)
- Données d'exploitation nécessaires dans le cadre d'une optimisation de l'exploitation (voir chapitre 16)
- Schéma hydraulique, solution standard, description du fonctionnement/de la régulation
- Contrôle de l'espace disponible et des réserves dans la centrale de chauffage et sur le site
- Contrôle des aspects liés à la sécurité dans la centrale de chauffage, y compris le stockage du combustible (prescriptions spécifiques au pays dans le chapitre 19)

**Combustible et cendres**

- Logistique d'approvisionnement en combustible et d'élimination des cendres
- Besoins en combustible pour une année d'exploitation (quantité, type, qualité)
- Qualité du combustible conformément au contrat de livraison de combustible
- Effectuer une analyse du combustible et classer la qualité du combustible selon le QMB (chapitre 4)
- Capacités de stockage brutes et nettes des silos, entrepôts et stockages extérieurs
- Protocoles des dysfonctionnements dans le domaine des silos et du transport du combustible jusqu'à la combustion, ainsi que du dispositif de transport des cendres

**Distribution de chaleur**

- Réseau avec indication des dimensions des conduites et des niveaux de température
- Données de base et données annuelles nécessaires pour le tableau Excel « Relevé de situation » (voir chapitre 11)
- Données d'exploitation nécessaires dans le cadre d'une optimisation de l'exploitation (voir chapitre 16)
- État général du réseau de chaleur, de la surveillance des fuites, des stations de transfert de chaleur et de la qualité de l'eau
- Enregistrements du volume de réalimentation nécessaire
- Schéma hydraulique d'une station de transfert de chaleur type

**Exploitation et maintenance (entretien, inspection, réparation (maintenance) et amélioration)**

- Coûts annuels de maintenance selon le chap. 17.3.2
- Coûts annuels moyens de réparation (coûts d'entretien) et d'amélioration selon le chapitre 17.3.3

**Conditions contractuelles et légales**

- Organisme responsable, forme juridique de l'exploitant de l'installation
- Contrat de fourniture de combustible
- Contrat de fourniture de chaleur avec prescriptions techniques de raccordement et modèle tarifaire
- Servitudes
- Contrats relatifs aux prestations fournies à des tiers (exploitation/gestion de l'installation, décompte de la chaleur, etc.)
- Prescriptions légales (valeurs limites d'émission, prescriptions en matière de protection des personnes et de protection contre les incendies et autres conformément au chapitre 19)
- Organisation de l'exploitation de l'installation

**Rentabilité**

- Toutes les données de base pour un calcul de rentabilité (voir l'outil de calcul de rentabilité (chapitre 10).
- Coûts effectifs d'énergie, d'exploitation et de maintenance ainsi que revenus provenant des frais de raccordement et de la vente de chaleur
- Estimation de l'évolution pour les cinq à dix prochaines années.

**Recensement du comportement opérationnel de la production et de la distribution de chaleur**

La collecte des données relatives au comportement opérationnel doit s'orienter vers l'optimisation opérationnelle conformément au chapitre 16 et à la FAQ 8. La saisie du comportement opérationnel dépend en grande partie de l'équipement de mesure dont disposent la centrale thermique et le réseau de chaleur, ainsi que de la forme sous laquelle les données d'exploitation peuvent être visualisées. Dans le meilleur des cas, cela peut se faire via la surveillance du système de gestion de l'exploitation (voir chapitre 16.3). Si peu ou pas de données d'exploitation sont enregistrées, l'évaluation du comportement opérationnel doit alors s'appuyer sur :

- Les observations du personnel d'exploitation
- Des observations ciblées à des dates choisies en hiver, pendant la période de transition et en été.
- Des mesures temporaires et ciblées à certaines dates en hiver, pendant la période de transition et en été, par exemple au moyen de mesures à long terme conformément au QS Support Chauffages au bois [141].

### 18.2.3 Évaluation des résultats de l'analyse de la situation actuelle

Différentes possibilités sont ensuite décrites pour mettre en relation les résultats de l'analyse du statu quo avec les valeurs caractéristiques des centrales de chauffage au bois QM.

**Tableau Excel « Relevé de situation »**

Le tableau Excel *« Relevé de situation »* ([110]) calcule les principaux indicateurs de l'installation, les compare aux valeurs de référence de QMB et permet ainsi de tirer des conclusions générales sur les aspects suivants :

- Nombre d'heures de fonctionnement à pleine capacité des chaudières à bois : quelles sont les réserves de puissance disponibles pour la production de chaleur ?
- Quelle est la part du bois dans la production annuelle de chaleur ?
- Le volume de l'accumulateur de stockage de chaleur est-il suffisant ?
- Le fonctionnement de la (plus petite) chaudière à bois est-il autorisé en été ?
- La densité de raccordement du réseau de chaleur est-elle suffisante ?
- Quelles sont les pertes liées à la distribution de chaleur ?
- Quel est le degré d'autonomie d'approvisionnement du dépôt de combustible ?
- Quel est le niveau de sécurité d'approvisionnement en chaleur en cas de panne de la plus grande chaudière à bois ?

### Optimisation de l'exploitation selon le jalon MS5

Si la collecte des données d'exploitation et du comportement opérationnel peut être effectuée conformément au chapitre 16, les principaux indicateurs de l'installation peuvent également être établis à l'aide du tableau Excel « Relevé de situation » (relevé de situation). De plus, il est également possible de tirer des conclusions sur le comportement opérationnel, par exemple :

- Le comportement opérationnel de l'installation correspond-il à la description fonctionnelle ? En quoi s'en écarte-t-il ?
- Faut-il s'attendre à une usure accrue de l'installation ou à une durée de vie réduite de certains composants tels que le revêtement de la chambre de combustion, les pierres de voûte, les éléments de grille, la vis sans fin à cendres, etc. ?
- Des pics de charge et des baisses de charge importants se produisent-ils dans le réseau de chaleur ?
- L'électrofiltre atteint-il la disponibilité annuelle prévue ?
- La consommation électrique de l'installation se situe-t-elle dans la fourchette prévue ?

Vous trouverez des infos utiles sur la mise en œuvre de l'optimisation de l'exploitation dans la FAQ 8 [142].

### Coûts d'entretien et de maintenance (voir chapitre 17)

Si vous disposez d'informations sur les coûts annuels moyens d'entretien et de maintenance, vous pouvez comparer ces valeurs avec les diagrammes correspondants et ainsi tirer des conclusions telles que:

- Les coûts annuels moyens d'entretien se situent-ils dans la fourchette attendue ?
- Existe-t-il un potentiel de réduction ?
- Les coûts annuels moyens de réparation (entretien) se situent-ils dans la fourchette attendue ?
- Peut-on les réduire en optimisant l'exploitation ?

### Outil de conseil pour la rénovation des installations de chauffage au bois

L'outil de conseil pour la rénovation des installations à énergie bois [16] permet de saisir les principales données techniques de l'installation relatives à la production et à la distribution de chaleur ainsi qu'à la rentabilité. L'outil calcule à partir de ces données les principaux paramètres techniques et économiques et les compare aux valeurs cibles du QM Chauffages au bois. Les résultats sont également représentés graphiquement, ce qui permet de voir rapidement si les valeurs caractéristiques de l'installation se situent dans la fourchette attendue ou si elles dépassent ou sont inférieures à la limite supérieure ou inférieure. Les résultats ainsi que les mesures d'optimisation ou de rénovation possibles sont discutés avec l'exploitant de l'installation.

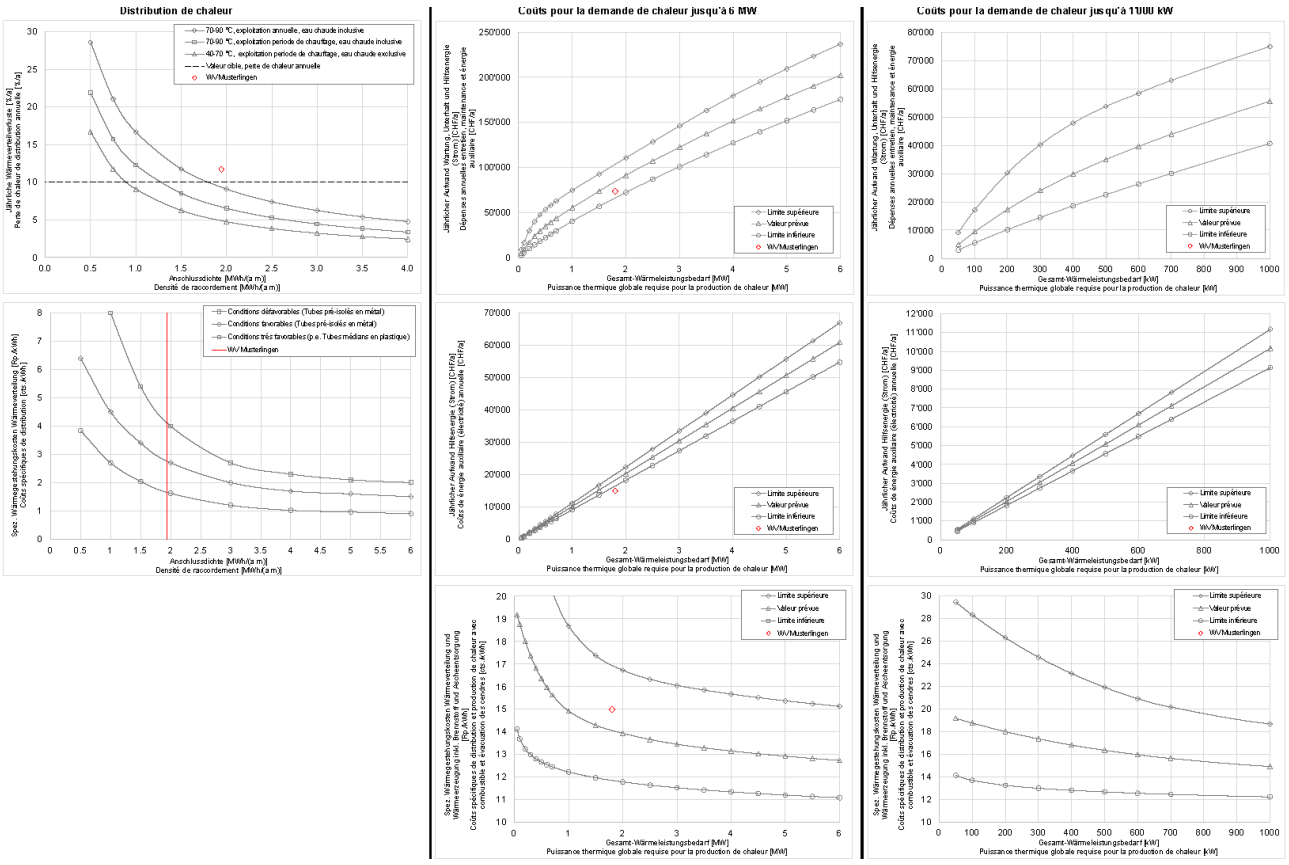



Figure 18.1 Extrait de l'outil de conseil pour la rénovation des chauffages au bois [16].

**Conseils sur les installations de chauffage par des responsables qualité en Autriche**

En Autriche, des conseils pour les installations de chauffage au bois (anciennes) sont proposés par l'État fédéral ou dans le cadre des programmes de subvention des Länder. Ces conseils sont dispensés par des experts indépendants (responsables qualité de klimaaktiv QM Heizwerke). Outre l'examen des données de l'installation et des documents pertinents, l'expert procède également à une visite d'une journée de l'installation. À l'issue de cette visite, un rapport écrit contenant des recommandations sur les mesures d'optimisation est établi.

**Comparaison des données d'exploitation dans la base de données QM Heizwerke**

En Autriche, le processus QM est pris en charge par la base de données klimaaktiv QM Heizwerke, dans laquelle toutes les données techniques et économiques pertinentes relatives aux installations sont enregistrées et documentées (voir chapitre 2.3.6). Cela inclut également la publication annuelle obligatoire des données d'exploitation les plus importantes. Sur cette base, des indicateurs importants sont calculés automatiquement et comparés aux valeurs cibles et aux valeurs de référence d'autres centrales thermiques (benchmarks) afin d'informer le personnel d'exploitation, les planificateurs et les responsables qualité. La figure 18.2 montre un exemple d'extrait des benchmarks d'une centrale thermique concernant la consommation électrique spécifique de l'ensemble de l'installation.

L'objectif de ce service de gestion du programme klimaaktiv QM Heizwerke est notamment de donner au personnel d'exploitation un aperçu de l'état actuel de l'installation (et de son évolution au cours des dernières années) et de l'inciter à s'intéresser aux données d'exploitation de son installation (voir également [143]). À l'aide des benchmarks, il est possible d'identifier les potentiels d'optimisation dans le contexte des conditions spécifiques à chaque site, le cas échéant avec l'aide d'experts.

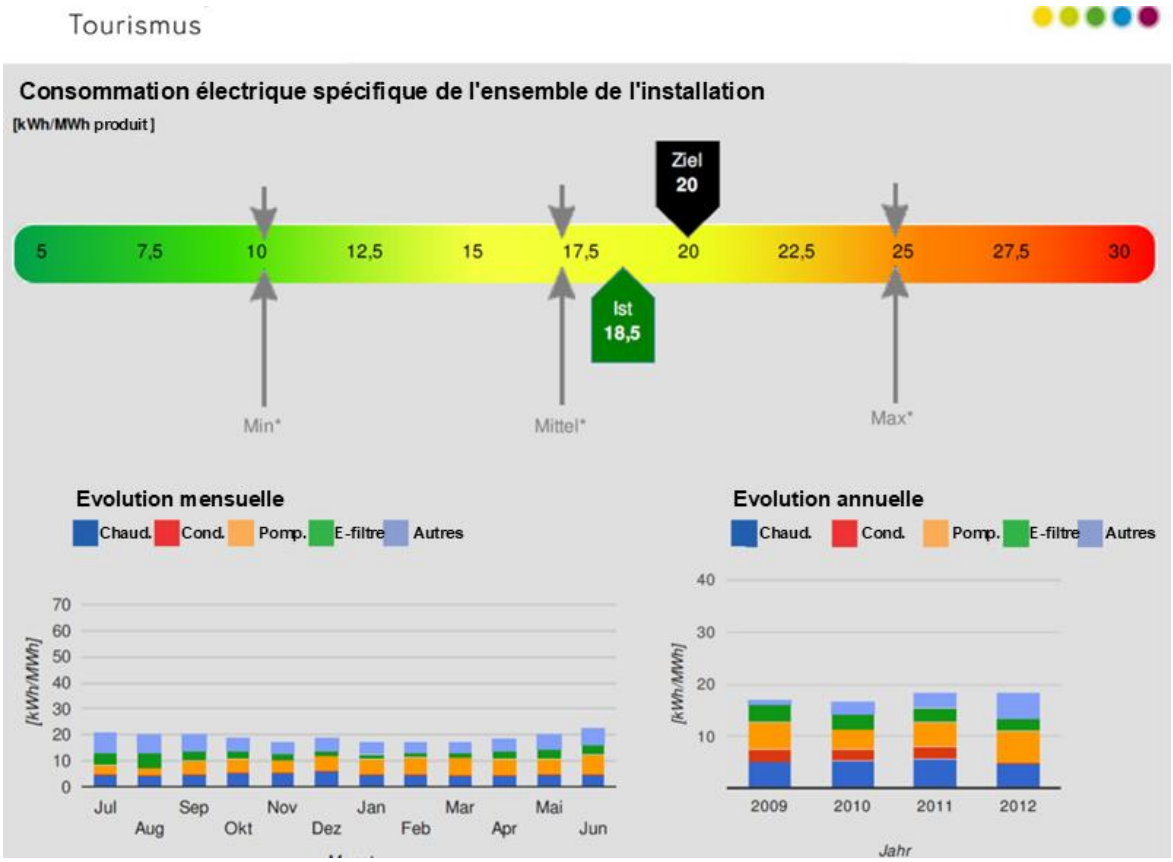



Figure 18.2 Exemple d'évaluation des benchmarks klimaaktiv QM Heizwerke (source: AEE INTEC).

**Analyse de la qualité des centrales de chauffage à biomasse**

Pour les centrales de chauffage au bois en Allemagne, C.A.R.M.E.N. e.V. propose aux exploitants une analyse dite « d'exploitation » [144]. La procédure s'inspire des consultations menées en Autriche pour les centrales de chauffage, et l'étendue de l'analyse peut être adaptée individuellement aux besoins du personnel d'exploitation.

**Outil Excel de calcul de rentabilité**

L'outil de calcul de rentabilité [145] présente de manière approfondie les aspects économiques actuels de l'installation et son évolution possible. Il ne formule certes aucune recommandation d'optimisation, mais permet de montrer très simplement comment des mesures/investissements visant à réduire les coûts ou à augmenter les rendements se répercuteront sur la rentabilité de l'installation.

**Analyses approfondies**

L'évaluation des documents et des résultats de l'analyse du statu quo peut conduire à la conclusion que des clarifications approfondies sont nécessaires, telles que :

- Visite/inspection de l'installation et d'une station de transfert type
- Mesures supplémentaires sélectionnées pour une évaluation approfondie du comportement en service
- Analyse approfondie du réseau de chaleur à l'aide d'outils d'analyse tels que THENA [107], Sophena [103], Mehrverbrauch [146], etc.
  - Identification des stations de transfert de chaleur défectueuses
  - Identification des potentiels dans les tronçons de réseaux de chaleur existants pour le raccordement de consommateurs de chaleur supplémentaires

## 18.2.4 Mesures visant à optimiser les installations existantes

### 18.2.4.1 Mesures de réduction des coûts

Dans de nombreux cas, l'optimisation d'une installation existante est motivée par un manque de rentabilité. Les mesures visant à réduire les coûts sont alors prioritaires. Les mesures de réduction des coûts comprennent:

**Garantir une qualité de combustible conforme**

L'utilisation de combustibles bon marché et de mauvaise qualité, qui ne répondent pas aux spécifications du système de combustion, peut entraîner des dysfonctionnements, une augmentation des coûts d'entretien et d'usure, ainsi que des émissions non autorisées, ce qui nuit à la rentabilité de l'installation.

- Vérifier/analyser la qualité du combustible
- Utiliser un combustible dont la qualité est adaptée au système de transport et au type de combustion
- Contrôle fréquent de la teneur en eau, contrôle périodique de la teneur en fines, des longueurs excessives et des impuretés
- Rejet systématique des combustibles non conformes.

**Réduire la consommation de combustible**

- Augmenter le rendement annuel des chaudières à bois:
  - Longues durées de fonctionnement grâce à une régulation de puissance adaptée combinée à un accumulateur de chaleur suffisamment dimensionné (si nécessaire, équiper l'accumulateur de chaleur d'un système de gestion de charge)
  - Réduire la teneur en oxygène résiduel dans les gaz de combustion dans toutes les plages de puissance par le fournisseur du système de combustion (optimisation de la régulation de la combustion, réglage de l'air, recirculation des gaz de combustion), contrôle annuel, vérifier régulièrement l'exactitude de la mesure de l'oxygène (sonde $O_2$, sonde lambda), vérifier l'étanchéité et l'entrée d'air parasite
  - Surveiller en permanence la température des gaz d'échappement et la réduire par des mesures de nettoyage automatisées appropriées de la chaudière ou, si nécessaire, par des intervalles de nettoyage plus courts
  - Envisager la mise en place de mesures visant à améliorer l'efficacité (p. ex. économiseur, condensation des gaz de combustion)
  - Vérifier si la chaudière à bois répond aux exigences pour un fonctionnement en été avec un combustible sec. Si ce n'est pas le cas :
    - Fonctionnement estival avec une chaudière fossile existante, qui fonctionnera à l'avenir si possible avec des biocombustibles gazeux ou liquides
    - Envisager l'installation d'une chaudière à bois plus petite pour le fonctionnement en été.
    - Envisager une alternative décentralisée pour la production d'eau chaude sanitaire en été et ne pas exploiter le réseau de chaleur pendant cette période.
- Réduire les pertes du réseau de chauffage :
  - Réguler la température de départ du réseau de chaleur en fonction des conditions météorologiques et la réduire au niveau minimal nécessaire.
  - Réduire la température de retour du réseau de chauffage :
    - Localiser les stations de transfert de chaleur défectueuses à l'aide d'une analyse de la surconsommation des consommateurs de chaleur (voir le manuel de planification du chauffage à distance [19] chapitre 10).
    - Contrôler le bon fonctionnement des installations côté primaire dans les stations de transfert de chaleur.
    - Réaménagement hydraulique des stations de transfert de chaleur défectueuses du côté secondaire
  - Appliquer ou, si nécessaire, introduire des prescriptions techniques de raccordement des stations de transfert de chaleur concernant les températures de retour maximales admissibles. Si la densité de raccordement du réseau de chaleur est trop faible, envisager une alimentation en eau chaude alternative et décentralisée pour le fonctionnement estival et ne pas exploiter le réseau de chaleur en été
  - Utiliser des conduites de chauffage à distance répondant aux normes d'isolation les plus strictes lors de l'extension du réseau de chauffage ou du renouvellement des canalisations

**Réduire les coûts d'entretien et de réparation (maintenance).**

- Optimiser les intervalles de nettoyage manuel en surveillant la température des gaz d'échappement. Utiliser des appareils auxiliaires.
- Automatiser les travaux de nettoyage manuels dans la mesure du possible grâce à des équipements adaptés.
- Envisager l'installation d'un système d'allumage automatique de la chaudière à bois

- Réduire les dysfonctionnements dans le système de transport du combustible en utilisant des combustibles de qualité conforme. Positionner de manière optimale les capteurs dans le système de transport du combustible et les régler de manière appropriée
- Contrôle/révision réguliers des composants de l'installation (contrat de service pour la détection précoce et la réparation des dommages)
- Garantir une qualité d'eau élevée (fluide caloporteur) afin d'éviter les dommages (corrosion, dépôts sur les compteurs de chaleur et les robinetteries, surchauffe dans la zone de la chaudière)
- Garantir un fonctionnement de l'installation avec une usure et une maintenance réduite :
  - Grâce à un réglage approprié des paramètres de régulation, afin que la chaudière à bois puisse fonctionner à tout moment avec un lit de combustion stable, sans formation de points chauds (volcans) ou de scories
  - En installant un accumulateur de chaleur avec une gestion appropriée de la charge de stockage afin d'obtenir des temps de fonctionnement longs et continus de la chaudière avec peu de phases de démarrage/arrêt.

**Réduire les coûts de consommation d'électricité**

- Viser un écart de température élevé entre la température de départ et la température de retour du réseau de chauffage à distance, si possible par des mesures qui abaissent la température de retour du réseau de chauffage à distance (côté primaire)
- Viser un écart de température maximal de 15 K entre la température de départ et la température de retour de la chaudière à bois à la puissance nominale
- Utiliser une régulation de pression différentielle appropriée pour les pompes de transport.
- Dimensionner de manière appropriée la pompe de transport pour le fonctionnement en hiver et en été
- Utiliser des entraînements et des agrégats à haut rendement énergétique (ventilateurs, pompes, technique de convoyage, compresseurs, etc.)
- Régulation de la vitesse des ventilateurs (au lieu de clapets d'étranglement)
- Éviter les pertes de pression inutiles dans les tuyauteries hydrauliques et les conduits d'évacuation des gaz brûlés
- Éviter les entrées d'air parasite dans les systèmes de combustion, les systèmes de séparation et les conduits d'évacuation des gaz brûlés
- Éviter les fuites d'air comprimé

### 18.2.4.2 Mesures visant à augmenter les rendements

Un manque de rentabilité nécessite toutefois également des mesures visant à augmenter les revenus. Parmi celles-ci figurent:

**Révision du modèle tarifaire**

- Vérifier les contrats de fourniture de chaleur (modèle tarifaire et structure tarifaire) et les adapter si nécessaire:
  - Réduire la dépendance des revenus annuels aux conditions météorologiques
  - Procéder à des ajustements tarifaires via une indexation appropriée

**Garantir la précision des compteurs de chaleur**

- Garantir une qualité d'eau élevée :
  - Garantir le bon fonctionnement des installations de traitement de l'eau (filtres magnétiques, dégazage, etc.). Si nécessaire, moderniser les installations en conséquence
  - Contrôler périodiquement la qualité de l'eau
- Vérifier la conformité de la position des compteurs de chaleur et faire recalibrer les compteurs de chaleur conformément aux dispositions légales

**Exploiter les réserves de puissance dans la production et la distribution de chaleur – densification du réseau**

- Vérifier les réserves de puissance dans le réseau de chaleur ou dans des tronçons partiels à l'aide d'outils d'analyse de réseau appropriés (par exemple THENA [107] ou autres)
- Densification du réseau par l'acquisition de clients de chaleur appropriés dans le périmètre du réseau de chaleur existant

**Développement de la production et de la distribution de chaleur – extension du réseau**

- À l'aide d'outils d'analyse de réseau adaptés, il est possible de mettre en évidence les réserves encore disponibles dans le réseau de chaleur et de mieux identifier les clients potentiels. L'extension du réseau de chaleur ne doit être envisagée que si les caractéristiques techniques de QMB et une vente de chaleur garantie contractuellement de 60 % du potentiel de chaleur à exploiter sont atteintes.
- S'assurer que la ou les chaudières à bois atteignent leur puissance nominale
- Extension de la capacité de production de chaleur :
  - Vérifier les capacités d'approvisionnement en combustible
  - Vérifier l'espace disponible dans la chaufferie pour une chaudière à bois supplémentaire ou pour le remplacement d'une chaudière à bois existante par une chaudière à bois plus grande
  - Ne procéder qu'une fois que le nombre d'heures de fonctionnement à pleine capacité prévu pour les chaudières à bois existantes est atteint

### 18.2.4.3 Autres mesures

D'autres mesures doivent également être envisagées, notamment les suivantes:

**Garantir la sécurité de fonctionnement et la sécurité de l'approvisionnement en chaleur**

- Analyser et éliminer les lacunes en matière de sécurité pour les personnes et les machines
- Pour les centrales de chauffage sans chaudières à combustibles fossiles, prévoir des raccordements pour l'utilisation d'une centrale de chauffage mobile externe
- Mettre en place une organisation opérationnelle garantissant le maintien de l'exploitation en cas d'absences pour cause de vacances ou de maladie

**Garantir une part élevée d'énergies renouvelables dans la production annuelle de chaleur**

- Veiller à ce que la chaudière à combustible fossile soit mise en service aussi tard que nécessaire en cas de pic de demande et arrêtée aussi tôt que possible

**Réduction des émissions**

- Les mesures énumérées contribuent à réduire les émissions indésirables pendant le fonctionnement normal et les phases de fonctionnement instables des chaudières à bois.
- Envisager l'installation de dépoussiéreurs même en l'absence d'exigences légales plus strictes afin d'augmenter de manière proactive l'acceptation des installations de chauffage au bois.

**Mesures commerciales/administratives**

- Vérification régulière des dépenses et de la structure des coûts ainsi que des économies potentielles possibles.
- Réorganiser le financement si nécessaire
- Optimisation des tarifs d'électricité par la comparaison des tarifs et l'achat commun d'électricité/le regroupement des achats d'électricité (par exemple via des associations d'exploitants). La préférence devrait être donnée à l'électricité verte certifiée.
- Coopération entre plusieurs installations pour la gestion des pièces de rechange, l'élimination commune des cendres et l'achat de combustibles
- Optimisation des tarifs d'assurance et autres dépenses
- Utilisation d'outils logiciels pour simplifier le décompte des frais de chauffage et la gestion opérationnelle

## 18.3 Rénovation des installations existantes

### 18.3.1 Introduction

L'analyse et l'évaluation des installations existantes décrites au chapitre 18.2 visent à optimiser les composants existants des installations de production et de distribution de chaleur et à améliorer ainsi la situation technique et économique de l'ensemble de l'installation. L'évaluation peut toutefois également conclure que certains composants de l'installation, voire l'ensemble de l'installation, doivent être renouvelés. Dans la plupart des cas, cela concerne le domaine de la production de chaleur.

Même sans analyse préalable d'une installation, les raisons suivantes peuvent conduire à la modernisation de certains composants, à un renouvellement partiel ou même à un renouvellement complet de la production de chaleur:

- Difficultés économiques persistantes
- Fin de la durée de vie prévue des composants ou des chaudières à bois
- Modification des dispositions légales, par exemple en matière de valeurs limites d'émission, d'obligation de stockage de chaleur, d'obligation de prouver le fonctionnement du dépoussiérage, de restriction de l'utilisation de combustibles fossiles
- Plaintes des voisins en raison de nuisances sonores ou olfactives à proximité immédiate de la centrale de chauffage
- Expiration imminente des délais de rénovation pour la mise en œuvre des décisions administratives, par exemple la mise à niveau des dépoussiéreurs et/ou des accumulateurs de chaleur

Lorsqu'une installation existante fait l'objet d'une rénovation partielle ou totale, il convient de toujours examiner le potentiel d'optimisation présenté au chapitre 18.2 et, dans la mesure du possible, de l'exploiter pleinement.

### 18.3.2 Procédure à suivre en cas de rénovation

Même si, à première vue, seul le remplacement d'un seul composant est envisagé, une analyse globale de l'installation par un expert est nécessaire dans tous les cas. Les étapes suivantes sont nécessaires pour le remplacement d'installations existantes :

- Analyse de la situation actuelle de la technologie existante et de la situation économique actuelle
- Évaluation des résultats de l'analyse de la situation actuelle
- Présentation des mesures de rénovation et de réhabilitation avec analyse coûts/bénéfices (si nécessaire, réalisation d'études approfondies dans certains domaines) et recommandation d'une stratégie de rénovation
- Mise en œuvre de la stratégie de rénovation et contrôle des résultats

Si un renouvellement complet d'une installation existante est envisagé, la procédure à suivre est en principe la même que pour la réalisation d'une nouvelle installation. Il convient alors de suivre l'ensemble du processus de planification décrit dans la partie 3 du manuel de planification. Il est généralement recommandé de faire accompagner le renouvellement d'une installation par QM Chauffages au bois.

**Analyse de la situation actuelle avec évaluation des résultats**

Dans un premier temps, l'outil de conseil pour la rénovation des installations de chauffage au bois présenté au chapitre 18.2.3 peut être utilisé pour identifier les pre-

miers axes prioritaires pour d'éventuelles mesures de rénovation et de réhabilitation. Dans un deuxième temps, il convient de réaliser l'analyse détaillée du statu quo technique et économique décrite au chapitre 18.2.2**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**. L'évaluation des résultats doit également tenir compte des aspects suivants :

- **Évaluation de la situation** (voir chapitre 11) : outre les besoins annuels en chaleur et les besoins en puissance thermique de l'installation actuelle, il convient notamment de tenir compte de l'évolution à moyen et long terme de la zone d'approvisionnement en chaleur potentielle, c'est-à-dire des futures rénovations thermiques des bâtiments ainsi que du développement futur des logements, des commerces et de l'industrie dans la zone d'approvisionnement en chaleur. Il convient ici de trouver un équilibre entre une estimation aussi réaliste que possible du développement futur et des réserves inutiles et trop importantes.
- **Distribution de chaleur** (voir chapitre 12) : outre la densification du réseau de chaleur existant, il convient également d'étudier la possibilité d'étendre ce dernier. Pour ce faire, il est nécessaire de procéder à des analyses approfondies du potentiel de performance du réseau de chaleur existant à l'aide d'outils d'analyse tels que THENA [107], Sophena [103] ou autres. Si d'autres réseaux de chaleur sont en service à proximité immédiate ou dans un périmètre plus large du réseau de chaleur existant, il convient également d'étudier la possibilité d'une fusion avec ces réseaux. En cas de taux de fuite élevés, de ruptures de canalisations fréquentes ou d'incertitudes quant à l'état du réseau de chaleur et à sa durée de vie restante, il est recommandé de procéder à une analyse approfondie du réseau de chaleur avec l'aide d'experts ou d'entreprises spécialisées.
- **Production de chaleur** (voir chapitre 13) : l'analyse doit porter sur tous les systèmes et composants existants de la centrale de chauffage, c'est-à-dire les générateurs de chaleur, les accumulateurs, le système hydraulique, les pompes, la logistique du combustible et des cendres, les systèmes de mesure, de régulation et de surveillance, ainsi que la visualisation des processus. Des investigations approfondies doivent permettre de déterminer
  - L'état des systèmes et composants existants et déterminer s'ils peuvent continuer à être utilisés à moyen ou long terme.
  - Si des mesures visant à améliorer l'efficacité/la récupération de chaleur peuvent être mises en œuvre.
  - Si les capacités de stockage existantes sont suffisantes ou si des capacités de stockage supplémentaires apporteraient un avantage.
  - Si des mesures visant à réduire les coûts d'entretien et de réparation peuvent être mises en œuvre.
  - Si des mesures visant à réduire les émissions sonores de la centrale de chauffage au bois peuvent être mises en œuvre.
  - Si des mesures visant à éviter les nuisances olfactives peuvent être mises en œuvre (augmentation de la hauteur de la cheminée, optimisation du processus de combustion).
  - Si des sources de chaleur alternatives potentielles peuvent être intégrées.
  - Si les systèmes de régulation et de collecte de données peuvent être modernisés.
  - Si un échelonnement approprié des différentes mesures est possible et comment l'approvisionnement en chaleur peut être assuré pendant la rénovation de l'installation.
- **Combustible** (voir chap. 4) : il convient de déterminer comment le potentiel de bois disponible évoluera à l'avenir et si la qualité du combustible disponible est adaptée aux composants existants et/ou nouveaux.
- **Bâtiment de la centrale de chauffage** : il convient de déterminer comment les composants qui ne sont plus utilisés peuvent être retirés de la centrale de chauffage et comment les nouveaux composants peuvent être installés. Si nécessaire, des mesures de construction appropriées doivent être prévues.
- **Rentabilité** (voir chapitre 10) : dans le cadre de l'analyse des contrats de fourniture de chaleur, il convient également de vérifier si l'exploitant de l'installation peut adapter les tarifs de chauffage.
- **Aspects juridiques** : il convient de déterminer si le cadre juridique (p. ex. valeurs limites d'émission, procédures d'autorisation et d'approbation) a changé et quel est l'impact de ces changements sur les mesures de rénovation potentielles.

**Présenter la stratégie de rénovation dans une étude de faisabilité**

Une étude de faisabilité doit évaluer différentes variantes de mesures de rénovation et de réhabilitation à l'aide d'une analyse coûts-bénéfices et inclure les points suivants:

- Évaluation globale de l'installation existante
  - Potentiel de l'installation existante
  - Potentiel d'extension du réseau de chaleur
  - Situation des consommateurs de chaleur
  - Évolution politique et sociale
- Présenter les mesures de rénovation (voir chap. 11.2)
- Présenter les mesures de rénovation pour la production de chaleur :
  - Installer ou remplacer des filtres
  - Moderniser le stockage, moderniser ou améliorer la gestion du chargement du stockage
  - Modifier ou remplacer le système d'alimentation en combustible
  - Remplacer une ou plusieurs chaudières à bois
  - Modernisation de la recirculation des gaz d'échappement à plusieurs niveaux (primaire/secondaire)
  - Modernisation de la récupération de chaleur
  - Optimisation du système hydraulique dans la chaufferie
  - Nouvelle logistique pour le décendrage et le système de transport des cendres, y compris le stockage intermédiaire des cendres

  - Intégration de nouveaux caloporteurs/sources de chaleur
  - Examiner la possibilité de produire de l'électricité
- Présenter des mesures de rénovation pour la distribution de chaleur :
  - Professionnalisation de l'acquisition et du service à la clientèle
  - Définir les étapes de développement
  - Réduire la température de retour pour la mise à niveau de la récupération de chaleur
  - Élaborer un concept de rénovation et de modernisation à long terme pour le réseau de chaleur. Cela comprend notamment la rénovation systématique de sections de conduites, la coordination avec d'autres activités de construction (par exemple, la rénovation des routes) dans la zone d'approvisionnement, le remplacement des échangeurs de chaleur, des régulateurs, des vannes de régulation ou de l'ensemble de la station de transfert domestique.
- Vérifier l'échelonnement approprié des différentes mesures de rénovation
- Montrer comment le fonctionnement de l'installation sera assuré pendant la phase de transformation
- Proposer de nouveaux services (connexion Internet par fibre optique, pose de câbles dans les gaines existantes du réseau de chaleur, réseau de froid supplémentaire, extension des services pour les clients du chauffage (optimisation secondaire ou nettoyage des échangeurs de chaleur, covoiturage électrique, etc.)
- Recommander une stratégie commune de rénovation et de réhabilitation

**Mise en œuvre de la stratégie de rénovation**
Les mesures de rénovation et de réhabilitation décidées doivent être mises en œuvre et un contrôle des résultats doit être effectué (par exemple, par le biais d'un accompagnement avec QM Chauffages au bois).

### 18.3.3 Rénovation impossible

L'étude de faisabilité peut conclure qu'une rénovation n'est pas possible ou ne peut être réalisée que dans des conditions très difficiles en raison de contraintes techniques ou administratives. Les raisons peuvent être le manque d'espace dans la centrale de chauffage ou sur le terrain, l'expiration des baux, l'absence ou l'inaccessibilité des permis de construire ou d'exploitation, ou encore des changements importants dans les conditions techniques ou légales. Il est également possible que la rentabilité d'une rénovation ou le financement nécessaire ne puissent être garantis. Dans de telles situations, d'autres solutions doivent être envisagées afin d'assurer le fonctionnement futur de l'installation.

**Construction d'une nouvelle installation de production de chaleur**
Si la rénovation de l'installation de production de chaleur existante n'est pas possible, il convient d'examiner si la centrale de chauffage existante peut être mise hors service et si une installation entièrement nouvelle peut être construite au même endroit ou à un autre endroit dans la zone du réseau de chaleur existant. Cela offre la possibilité de lancer un processus de planification fondamentalement nouveau sans restrictions techniques et économiques. Cela permet notamment de densifier et d'étendre le réseau de chauffage existant. La conception du nouveau système de production de chaleur offre la possibilité de réaliser une installation avec des coûts d'exploitation et de combustible réduits, car :

- Des gammes de combustibles moins coûteuses peuvent être utilisées.
- La logistique des combustibles et des cendres peut être redéfinie.
- De nouveaux caloporteurs/sources de chaleur peuvent être intégrés.
- Une technologie de combustion et un dimensionnement de l'installation peuvent être choisis qui permettent d'atteindre un rendement annuel élevé, de réduire les coûts d'entretien et de réparation et offrent un grand potentiel d'extension à long terme.

**Regroupement avec d'autres installations**
Il convient également d'examiner si les problèmes existants pourraient être résolus non pas par une rénovation/construction neuve, mais par une fusion du réseau de chaleur existant avec un autre réseau de chaleur situé à proximité. Si la capacité de production de l'autre centrale de chauffage n'est pas suffisante pour fusionner les deux réseaux de chaleur ou si les réserves d'extension sont déjà épuisées, il est également possible d'examiner si une nouvelle centrale de chauffage commune aux deux réseaux de chaleur peut être construite sur un nouveau site.

Si plusieurs autres réseaux de chaleur existent à proximité immédiate ou dans les environs de la production de chaleur existante, il convient d'examiner si une fusion de tous les réseaux de chauffage à distance est envisageable et avantageuse. Dans ce cas, les centrales de chauffage individuelles peuvent continuer à être utilisées conjointement ou une nouvelle centrale de chauffage peut être construite à un endroit approprié.

**Contrats de performance énergétique**

En cas de difficultés dans la mise en œuvre d'une rénovation d'installation, le recours à un entrepreneur peut également constituer une solution. La pratique a montré que les entrepreneurs spécialisés apportent souvent de nouveaux concepts, modèles commerciaux et perspectives de développement à long terme à un projet et peuvent ainsi faire avancer la revitalisation d'anciennes installations.

De plus, les entrepreneurs appropriés exploitent généralement déjà plusieurs centrales de chauffage au bois et réseaux de chaleur et disposent d'une expérience dans l'évaluation et la revitalisation d'installations existantes. Par exemple, une gestion centralisée, un marketing professionnel, le personnel d'exploitation existant ou les chaînes d'approvisionnement en combustible existantes permettent d'exploiter des synergies et de réduire les coûts.

# Annexe

# 19 Réglementations

La construction et l'exploitation d'une centrale de chauffage au bois doivent respecter de nombreuses exigences. Il incombe au concepteur de connaître et d'appliquer les lois, ordonnances, normes et directives locales en vigueur ainsi que les autres réglementations applicables. Vous trouverez ci-dessous une sélection de réglementations pertinentes pour la Suisse, l'Allemagne et l'Autriche. Outre les réglementations nationales, les réglementations internationales peuvent également être importantes, par exemple celles de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) ou du Comité européen de normalisation (CEN). La sélection est basée, entre autres, sur les thèmes suivants :

**Exigences en matière de combustibles**

Les exigences en matière de combustibles des réglementations mentionnées définissent, entre autres, quels combustibles sont autorisés pour quel type de combustion.

**Émissions polluantes**

Les émissions de polluants atmosphériques tels que les poussières et le monoxyde de carbone, parfois aussi les oxydes d'azote et le dioxyde de soufre, sont limitées. En règle générale, les limites dépendent de la puissance thermique de combustion d'une centrale de chauffage au bois et du combustible utilisé.

**Cendres**

La loi réglemente entre autres le transport des cendres de bois, leur éventuelle utilisation comme engrais et/ou l'élimination des cendres (de filtrage). En vue d'une utilisation future des cendres, il est nécessaire de collecter séparément les différentes fractions de cendres.

**Sécurité (protection des personnes, prévention des accidents)**

La prévention des accidents est généralement importante. Par exemple, les entrepôts de combustible bois doivent être sécurisés contre les chutes et les déversements lors de leur accès, et les systèmes de convoyage doivent être sécurisés contre les blessures. Le stockage de combustible humide génère des gaz de fermentation qui peuvent s'accumuler au fond du silo, de la salle hydraulique et de la chaufferie ; les zones à risque doivent être équipées de dispositifs de ventilation appropriés afin d'éviter tout risque d'asphyxie pour le personnel. Dans certains cas, les autorités compétentes exigent en outre l'installation de détecteurs de CO pour la protection des personnes. Une notice indiquant la formation possible de moisissures et le danger pour la santé qui y est associé doit être apposée sur le silo à plaquettes. Lors du stockage de granulés de bois dans un espace clos, une notice indiquant le danger de formation de monoxyde de carbone est nécessaire. Le transbordement des cendres peut également présenter des dangers contre lesquels le personnel doit être protégé par des mesures appropriées (par exemple, protection contre la poussière).

**Dispositifs de sécurité hydrauliques**

L'installation de dispositifs de sécurité doit permettre d'empêcher toute augmentation inadmissible de la température ou de la pression dans le système hydraulique de production de chaleur, en particulier dans la chaudière.

**Protection contre les incendies**

La formation et la propagation d'incendies dans la chaufferie et le local de stockage du combustible doivent être empêchées par des dispositifs appropriés et des mesures constructives. Les issues de secours nécessaires doivent être garanties.

**Protection contre le bruit**

Les effets de la propagation du bruit (bruit aérien et bruit solidien) lors du fonctionnement d'une centrale de chauffage au bois doivent être clarifiés dans tous les cas, et les ordonnances régionales sur la protection contre le bruit doivent être respectées. Les principales sources de bruit sont le ventilateur d'évacuation des gaz brûlés, l'embouchure de la cheminée, les techniques de déchargement, de convoyage et de transport des silos ainsi que, le cas échéant, le traitement des plaquettes de bois sur place. Les émissions sonores doivent être réduites par des mesures appropriées.

**Protection contre la foudre**

La centrale de chauffage au bois, le parc de machines et le réseau de chauffage à distance doivent être protégés contre la foudre à l'aide de dispositifs de protection contre la foudre et les surtensions.

**Protection contre les explosions**

Dans les zones dangereuses présentant un risque d'explosion, des mesures préventives doivent être prévues tant au niveau de la construction que de l'exploitation.

### Prescriptions, ordonnances, normes et directives en Suisse

Lors de la réalisation d'une installation de chauffage en Suisse, de nombreuses dispositions légales, ordonnances, directives et normes doivent être respectées. Vous trouverez ci-dessous une sélection des prescriptions importantes pour la technique de chauffage et l'utilisation énergétique du bois. Cette liste ne prétend pas être exhaustive. Les dispositions légales doivent toujours être appliquées dans leur version actuelle en vigueur.

Tableau 19.1 Prescriptions, ordonnances, normes et directives en Suisse (sélection).

| Thème | Titre abrégé | Désignation |
|---|---|---|
| **Évaluation des besoins** | Norme SIA 380/1 | Bases pour les calculs énergétiques des bâtiments |
| | Norme SIA 384/1 /2 /3 | Installations de chauffage dans les bâtiments |
| | Norme SIA 385/1 | Installations d'eau chaude sanitaire dans les bâtiments – Bases et exigences |
| **Dispositions contractuelles** | SIA 108 | Règlement concernant les prestations et les honoraires des ingénieurs dans la technique du bâtiment, la construction mécanique et l'électrotechnique |
| | SIA 112 | Modèle de planification de la construction |
| | SIA 118 | Conditions générales pour les travaux de construction |
| **Exigences en matière de combustibles** | OPair | Ordonnance sur la protection de l'air |
| | EN ISO 17225 | Biocombustibles solides (remplace la norme EN 14961) |
| **Exigences en matière d'émissions** | LRV | Ordonnance sur la protection de l'air |
| | Cercl'Air | |
| | Recommandation n° 31p | « Surveillance des émissions », chauffages au bois de plus de 70 $kW_{PC}$ |
| **Cendres** | VVEA | Ordonnance sur la prévention et l'élimination des déchets |
| | VeVA | Ordonnance sur les mouvements de déchets |
| **Sécurité** | Suva | Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents<br>Silos à plaquettes vertes (réf. 66050.D)<br>Liste de contrôle pour les silos à plaquettes vertes (réf. 67006.D)<br>Liste de contrôle pour les silos à copeaux de bois (réf. 67007.D)<br>Fiche technique sur la protection contre les explosions (www.suva.ch/2153.d)<br>SUVA 88813 – Les huit règles vitales de la maintenance |
| | SWKI | Association suisse des ingénieurs en technique du bâtiment<br>Directive 91-1 Ventilation et aération des chaufferies<br>Directive HE301-01 Dispositifs de sécurité pour installations de chauffage (remplace la directive 91-1 avec les compléments n° 1 et 2)<br>BT 102-01 Qualité de l'eau pour les installations techniques du bâtiment<br>Directive HE200-01 Stockage des granulés de bois chez le client final |
| | SN EN 12779 | Sécurité des machines à bois - Installations fixes d'aspiration de poussière et de plaquettes de bois - Exigences de sécurité |
| | Information DGUV 209-083 | Silos pour le stockage de la poussière et des copeaux de bois - Conception structurelle, exploitation |
| | Information DGUV 209-045 | Systèmes d'aspiration et silos pour la poussière et les copeaux de bois ; protection contre les incendies et les explosions<br>Information BGI 739-2 |
| | DGV | Ordonnance sur les équipements sous pression DGV (RS 930.114) |
| | proPellets.ch | Le stockage des granulés de bois 2024 |
| | SN EN ISO 20023:2019 | Combustibles solides biogènes - Sécurité des combustibles solides biogènes - Manipulation et stockage sûrs des granulés de bois dans les foyers domestiques et autres petits foyers |
| | SN EN ISO 20024:2020-08 | Combustibles solides biogènes - Manipulation et stockage sûrs des granulés issus de combustibles solides biogènes dans les applications commerciales et industrielles |
| **Protection incendie** | AEAI | Association des établissements cantonaux d'assurance incendie<br>Directive de protection incendie 24-15 Installations thermiques<br>104-15 Chauffages à plaquettes<br>105-15 Chauffages à copeaux<br>106-15 Chauffages à pellets<br>Installations d'évacuation des fumées |
| | Prescriptions locales en matière de protection contre les incendies | |
| **Protection contre le bruit** | LSV | Ordonnance sur la protection contre le bruit |
| | SIA 181 | Isolation acoustique dans le bâtiment |
| **Section transversale de la cheminée** | OPair | Ordonnance sur la protection de l'air |
| | SIA 384/4 | Cheminées pour le chauffage domestique |
| **Hauteur de cheminée** | OFEV | Office fédéral de l'environnement<br>UV-1318-D Hauteur minimale des cheminées au-dessus du toit |

**Prescriptions, ordonnances, normes et directives en Allemagne**

Lors de la mise en place d'un système de chauffage en Allemagne, de nombreuses dispositions légales, ordonnances, directives et normes doivent être respectées. Outre le droit allemand, les dispositions légales et normes européennes prennent de plus en plus d'importance. Vous trouverez ci-dessous une sélection des prescriptions importantes pour la technique de chauffage et l'utilisation énergétique du bois. Cette liste ne prétend pas être exhaustive. Les dispositions légales doivent toujours être appliquées dans leur version actuelle en vigueur.

Tableau 19.2 Réglementations, ordonnances, normes et directives en Allemagne (sélection).

| Thème | Titre abrégé | Désignation |
|---|---|---|
| **Évaluation des besoins** | GEG | Loi sur l'énergie dans les bâtiments |
| | DIN EN 12831 | Installations de chauffage dans les bâtiments |
| | DIN V 18599 | Évaluation énergétique des bâtiments |
| | DIN EN ISO 52016-1 | Évaluation énergétique des bâtiments |
| | VDI 2067 | Rentabilité des installations techniques des bâtiments |
| **Dispositions contractuelles** | BGB | Code civil allemand |
| | VgV | Règlement sur les marchés publics |
| | VOB | Règlement allemand relatif à la passation des marchés et aux contrats de travaux |
| | AVBFernwärmeV | Règlement sur les conditions générales d'approvisionnement en chauffage à distance |
| | HeizKV | Règlement relatif au décompte des frais de chauffage et d'eau chaude en fonction de la consommation |
| | HOAI | Barème des honoraires pour les architectes et ingénieurs |
| **Exigences en matière de combustibles** | BImSchG | Loi fédérale sur la protection contre les émissions |
| | TA Luft | Directive technique relative à la préservation de la qualité de l'air |
| | 1. BImSchV | Règlement relatif aux petites et moyennes installations de combustion |
| | 4. BImSchV | Règlement relatif aux installations soumises à autorisation |
| | 13e BImSchV | Règlement relatif aux grandes installations de combustion, aux turbines à gaz et aux moteurs à combustion |
| | 44e BImSchV | Règlement relatif aux installations de combustion, turbines à gaz et moteurs à combustion de taille moyenne |
| | DIN EN ISO 17225 | Combustibles solides biogènes (remplace la norme DIN EN 14961) |
| **Exigences en matière d'émissions et d'immissions** | BImSchG | Loi fédérale sur la protection contre les émissions |
| | TA Luft | Directive technique relative à la préservation de la pureté de l'air |
| | 1. BImSchV | Règlement relatif aux petites et moyennes installations de combustion |
| | 4. BImSchV | Règlement relatif aux installations soumises à autorisation |
| | 13e BImSchV | Règlement relatif aux grandes installations de combustion, aux turbines à gaz et aux moteurs à combustion |
| | 44e BImSchV | Règlement relatif aux installations de combustion, turbines à gaz et moteurs à combustion de taille moyenne |
| | VDI 2066 | Mesure des particules |
| | VDI 3462-4 | Réduction des émissions |
| | VDI 3253 | Émissions provenant de sources fixes : méthodes de vérification qualitative du fonctionnement continu et efficace des dépoussiéreurs dans les installations de combustion de combustibles solides d'une puissance thermique nominale comprise entre 1 MW et moins de 5 MW |
| | AwSV | Règlement relatif aux installations de manipulation de substances dangereuses pour l'eau |
| | BBodSchV | Règlement fédéral sur la protection des sols et les sites contaminés |
| **Cendres** | KrWG | Loi sur le recyclage |
| | DüG | Loi sur les engrais |
| | AVV | Règlement sur le catalogue des déchets |
| | BioAbfV | Règlement sur les déchets biodégradables |
| | DepV | Règlement sur les décharges |
| | DüMV | Règlement sur les engrais |
| | DüV | Règlement sur les engrais |
| | NachwV | Règlement sur les justificatifs |

| Thème | Titre abrégé | Désignation |
|---|---|---|
| **Sécurité** | UVV | Règles de prévention des accidents |
| | DGUV | Règles et réglementations DGUV |
| | MRL | Directive Machines |
| | DGRL | Directive relative aux équipements sous pression |
| | Directive basse tension | Directive basse tension |
| | Directive CEM | Directive sur la compatibilité électromagnétique |
| | REACH | Règlement REACH |
| | BetrSichV | Règlement sur la sécurité au travail |
| | DIN EN ISO 12100 | Sécurité des machines |
| | DIN EN 303-5 | Chaudières – Chaudières à combustibles solides, alimentation manuelle et automatique, puissance thermique nominale jusqu'à 500 kW – Termes, exigences, essais et marquage |
| | DIN EN 12828 | Installations de chauffage dans les bâtiments – Conception des installations de chauffage à eau |
| | DIN EN 61000 | Compatibilité électromagnétique (CEM) |
| | DIN 4747 | Installations de chauffage à distance |
| | VDI 2694 | Bunkers et silos |
| | VDI 2035 | Prévention des dommages causés par la corrosion et l'entartrage dans les installations de chauffage à eau chaude |
| | VDI 3464 | Stockage de granulés de bois chez le consommateur - Exigences relatives au stockage, à la fabrication et à la livraison des granulés sous l'angle de la santé et de la sécurité |
| | AGFW-FW | Règlement AGFW |
| | DEPV | Brochure sur le stockage des granulés de bois |
| **Protection contre les incendies et les explosions** | MBO | Règlement type de construction |
| | FeuV | Règlement sur les installations de combustion |
| | VVB | Règlement sur la prévention des incendies |
| | ATEX | Directive ATEX pour les fabricants, directive ATEX pour les exploitants |
| | ISO 8421 | Protection contre les incendies, termes |
| | DIN EN 1127 | Atmosphères explosives - Protection contre les explosions |
| | DIN 4102 | Comportement au feu des matériaux et composants de construction |
| | VDI 2263 | Feux de poussière et explosions de poussière |
| **Protection contre le bruit** | BImSchG | Loi fédérale sur la protection contre les émissions |
| | TA Lärm | Directive technique relative à la protection contre le bruit |
| | AGFW-FW | Règlement AGFW |
| **Cheminée** | TA Luft | Instructions techniques pour la préservation de la pureté de l'air |
| | DIN EN 13084 | Cheminées indépendantes |
| | DIN EN 13384 | Systèmes d'évacuation des fumées – Méthodes de calcul thermique et aérodynamique |
| | DIN 1298 | Installations d'évacuation des fumées – Raccords pour installations de combustion |
| | DIN 18160 | Installations d'évacuation des fumées |
| | VDI 3781-4 | Conditions de rejet des gaz de combustion |
| **Protection contre la foudre** | DIN EN 61643 | Dispositifs de protection contre les surtensions pour basse tension |

**Règlements, ordonnances, normes et directives en Autriche**

Lors de la réalisation d'une installation de chauffage en Autriche, de nombreuses dispositions légales, ordonnances, directives et normes doivent être respectées. Vous trouverez ci-dessous une sélection des prescriptions les plus importantes en Autriche pour la technique de chauffage et l'utilisation énergétique du bois. Cette liste ne prétend pas être exhaustive.

Les dispositions légales doivent toujours être appliquées dans leur version actuelle en vigueur. Les lois et règlements autrichiens peuvent être consultés gratuitement sur le site http://www.ris.bka.gv.at. Les normes et directives nationales en vigueur sont publiées, entre autres, par les organismes suivants :

- Institut autrichien de normalisation (Austrian Standards) - http://www.austrian-standards.at
- Association autrichienne pour l'électrotechnique (ÖVE) - http://www.ove.at
- Conseil autrichien pour la technologie agricole et le développement rural (ÖKL) - http://www.oekl.at
- Groupe de travail autrichien pour la lutte contre le bruit (ÖAL) - http://www.oal.at
- Organisme de contrôle pour la technique de protection contre les incendies - http://www.pruefstelle.at
- Caisse générale d'assurance accidents (AUVA) - http://www.auva.at.

Tableau 19.3 Règlements, ordonnances, normes et directives en Autriche (sélection).

| Thème | Titre abrégé | Désignation |
|---|---|---|
| **Exploitation d'installations** | GewO | Code du commerce |
| | NSG | Lois sur la protection de la nature des Länder |
| **Évaluation des besoins** | ÖNORM EN ISO 52016 | Lois sur la protection de la nature des Länder |
| **et conception** | ÖNORM EN 12828 | Installations de chauffage dans les bâtiments - Conception des installations de chauffage à eau chaude |
| | ÖNORM H 5151-1 | Conception d'installations de chauffage central à eau chaude avec ou sans production d'eau chaude sanitaire - Partie 1 : bâtiments dont la conductivité thermique spécifique est supérieure à 0,5 W/(K.m²) - Norme complémentaire à la norme ÖNORM EN 12828 |
| | ÖNORM EN 12831-1 | Installations de chauffage dans les bâtiments - Méthode de calcul de la charge thermique normalisée |
| | ÖNORM H 7500-1 | Systèmes de chauffage dans les bâtiments - Méthode de calcul de la charge thermique nominale pour les bâtiments ayant une valeur U moyenne >= 0,5 W/(m2 · K) - Complément national à la norme ÖNORM EN 12831-1 |
| | ÖNORM H 7500-3 | Systèmes de chauffage dans les bâtiments - Partie 3 : Méthode simplifiée de calcul de la charge thermique normalisée des bâtiments |
| | ÖNORM H 5142 | Installations techniques domestiques - Circuits hydrauliques pour installations de chauffage à eau chaude, systèmes de refroidissement et installations solaires thermiques |
| | ÖNORM B 2503 | Canalisations - Directives complémentaires |
| | ÖNORM B 2506 | Systèmes d'infiltration des eaux pluviales |
| | ÖNORM H 5050 | Performance énergétique globale des bâtiments |
| | OIB-RL 6/2019 | Économies d'énergie et isolation thermique |
| | ÖNORM M 7140 | Calcul comparatif économique pour les systèmes énergétiques selon des méthodes de calcul dynamiques |
| | Fiche technique ÖKL n° 67 | Planification de centrales de chauffage à biomasse et de réseaux de chauffage à distance |
| | VDI 2067 | Rentabilité des installations techniques des bâtiments |
| **Dispositions contractuelles** | BVerG | Loi fédérale sur les marchés publics |
| | HeizKG | Loi sur le décompte des frais de chauffage |
| | ÖNORM A 2050 | Attribution de marchés de services - Appel d'offres, offre et adjudication - Norme de procédure |
| | ÖNORM A 2060 | Dispositions contractuelles générales pour les prestations - Norme contractuelle |

| Thème | Titre abrégé | Désignation |
|---|---|---|
| **Exigences relatives aux combustibles** | ÖNORM EN ISO 17225 | Combustibles solides biogènes |
| | ÖNORM C4005 | Plaquettes de bois et bois broyé destinés à la valorisation énergétique dans des installations d'une puissance thermique nominale supérieure à 500 kW - Exigences et dispositions d'essai - Complément national à la norme ÖNORM EN ISO 17225-1 |
| | ÖNORM M 7132 | Utilisation énergétique du bois et de l'écorce comme combustible - Définitions et caractéristiques |
| | ÖNORM S2100 | Liste des déchets |
| **Exigences en matière d'émissions et d'immissions** | FAV | Règlement sur les installations de combustion |
| | AWG | Loi sur la gestion des déchets et concept de gestion des déchets (AWK) |
| | IG-L | Loi sur la protection contre les émissions - Air |
| | WRG | Loi sur le droit de l'eau |
| | AAEV | Ordonnance générale sur les émissions d'eaux usées |
| | IEV | Ordonnance sur les rejets indirects |
| | Directive 2000/76/CE | Directive relative à l'incinération des déchets |
| **Cendres** | AWG | Loi sur la gestion des déchets |
| | KPV | Ordonnance sur le compost |
| | AVV | Ordonnance sur le répertoire des déchets |
| | AbfallbilanzV | Ordonnance sur le bilan des déchets |
| | ALSAG | Loi sur l'assainissement des sites contaminés |
| | DMG | Loi sur les engrais |
| | ForstG | Loi sur les forêts |
| | WRG | Loi sur le droit de l'eau |
| | | Directives des Länder relatives aux cendriers |
| **Protection contre le bruit** | ÖNORM B 8115 | Isolation acoustique et acoustique des salles dans le bâtiment |
| | | Directives de l'Association autrichienne pour la lutte contre le bruit ÖAL |
| **Sécurité** | AschG | Loi sur la protection des travailleurs |
| | BauKG | Loi sur la coordination des travaux de construction |
| | ETG | loi sur l'électrotechnique |
| | AAV | Ordonnance générale sur la protection des travailleurs |
| | AstV | Ordonnance sur les lieux de travail |
| | BauV | Ordonnance sur la protection des travailleurs du bâtiment |
| | DDGV | Règlement sur les équipements sous pression à double usage |
| | ETV | Ordonnance sur l'électrotechnique |
| | ESV | Règlement sur la protection électrique |
| | ÖNORM EN 303-5 | Chaudières – Chaudières à combustibles solides, alimentation manuelle et automatique, puissance thermique nominale jusqu'à 500 kW – Termes, exigences, essais et marquage |
| | ÖNORM M 7510-4 | Contrôle des installations de chauffage – Contrôle simple des installations de combustion pour combustibles solides |
| | ÖVE E 8120 | Pose de câbles d'énergie, de commande et de mesure |
| | ÖVE/ÖNORM E 8200-627 | Câbles multiconducteurs et multipaires pour pose aérienne et souterraine |
| | ÖNORM B 2533 | Coordination des installations souterraines – Directives de planification (distances de pose des conduites dans le sol) |
| | ÖVE EN 50110 | Exploitation d'installations électriques |
| | DIN EN 61000 | Compatibilité électromagnétique (CEM) |
| | Fiches techniques AUVA | Informations de sécurité de l'organisme général d'assurance accident |
| | ÖNORM EN ISO 20023 | Combustibles solides biogènes - Sécurité des granulés issus de combustibles solides biogènes - Manipulation et stockage sûrs des granulés de bois dans les foyers domestiques et autres petits foyers |
| | ENplus® GD AT 3001:2024 | Guide ENplus® Stockage des granulés de bois |
| | ÖNORM H5195-1 | Caloporteurs pour installations techniques domestiques - Partie 1 : Prévention des dommages causés par la corrosion et l'entartrage dans les installations de chauffage à eau chaude fermées |

| Thème | Titre abrégé | Désignation |
|---|---|---|
| **Protection contre l'incendie** | ÖNORM EN 1366 | Essai de résistance au feu pour les installations |
| | ÖNORM B 3800 | Comportement au feu des matériaux et composants de construction |
| | ÖNORM F 1000 | Technique incendie et protection contre l'incendie |
| | ÖNORM H 5170 | Installations de chauffage – Exigences en matière de technique de construction et de sécurité |
| | | ainsi qu'en matière de protection contre l'incendie et de protection de l'environnement |
| | TRVB H118 | Chauffages automatiques au bois |
| | TRVB | Directives techniques relatives à la protection préventive contre les incendies |
| **Protection contre la foudre** | ÖVE E 40/1987 | Protection contre la corrosion des prises de terre et des pièces métalliques enterrées |
| | ÖVE/ÖNORM E 8049 | Protection contre la foudre des ouvrages de construction |
| **Protection contre les explosions** | ExSV 2015 | Règlement sur la protection contre les explosions |
| | ElExV 1993 | Règlement sur les équipements électriques antidéflagrants |
| **Cheminée** | ÖNORM M 9440 | Propagation des substances polluantes dans l'atmosphère – Calcul des concentrations d'immissions |
| | DIN EN 13384 | Installations d'évacuation des gaz brûlés – Méthodes de calcul thermique et aérodynamique |

# 20 Calculs et conversions importants

## 20.1 Indice d'excès d'air lambda

Le coefficient d'excès d'air lambda (λ) décrit le rapport entre la quantité d'air de combustion fournie et la quantité stœchiométrique (= quantité minimale théoriquement nécessaire) :

$$\lambda = \frac{\text{débit d'air de combustion entrant}}{\text{quantité stœchiométrique d'air de combustion}} [-]$$

Le coefficient d'excès d'air influence la qualité et la température de combustion. Il peut être calculé à partir de la composition des gaz d'échappement [60]. Selon la méthode simplifiée, les formules suivantes peuvent être dérivées pour calculer Lambda :

$$\lambda = \frac{21}{21 - O_2 + 0.4 * CO} [-]$$

ou

$$\lambda = \frac{20.4}{CO_2 + CO} [-]$$

et

$$O_2 = 21 - CO_2 - 0.6 * CO [-]$$

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Avec : | $CO_2$ | = | Concentration de dioxyde de carbone dans les gaz d'échappement secs | [ % vol. ] |
| | CO | = | Concentration de monoxyde de carbone dans les gaz d'échappement secs | [ % vol. ] |
| | $O_2$ | = | Concentration en oxygène dans les gaz d'échappement secs | [ % vol. ] |
| | 20,4 | = | $CO_{2\,max}$ (= teneur maximale possible en $CO_2$ dans les gaz d'échappement) | [ % vol. ] |
| | 21 | = | Concentration en oxygène de l'air | [ % vol. ] |

**Exemple:**

Grandeurs mesurées : $O_2$ = 9,0 % en volume

CO = 250 ppm = 0,025 % en volume

Calcul: $\lambda = \frac{21}{21-9-0.4*0.025} = 1.75[-]$

Évaluation : le coefficient d'excès d'air lambda (λ) doit être aussi bas que possible (rendement de combustion élevé), mais il ne doit pas être trop bas, car une quantité insuffisante d'air de combustion détériore considérablement la qualité de la combustion et fait monter la température de combustion dans une plage critique (risque de formation de scories).

**Le coefficient d'excès d'air est généralement de λ ≈ 1.6 – 2.2 pour les chauffages au bois.**

**Remarque:** les sondes dites « sondes lambda » mesurent la teneur en oxygène ou l'indice d'excès d'air dans les gaz de combustion humides. La conversion en gaz de combustion secs est indiquée au chapitre 20.5.

## 20.2 Conversion de ppm en mg/m³

Les appareils de mesure des émissions de CO, HC et $NO_x$ indiquent généralement les valeurs mesurées en **% vol**. ou en **ppm**. L'unité ppm (ppm = parts per million = 1 : 1 000 000 = un millionième) correspond, tout comme le % vol., à *la proportion volumique* d'un gaz et est donc indépendante de la température et de la pression du gaz. La conversion de % vol. en ppm peut être effectuée conformément au Tableau 20.1.

Tableau 20.1 Conversion du % vol. en ppm

| % vol. | ppm |
|---|---|
| 100 | 1 000 000 |
| 10 | 100 000 |
| 1 | 10 000 |
| 0,1 | 1 000 |
| 0,01 | 100 |
| 0,001 | 10 |
| 0,0001 | 1 |

Les valeurs limites d'émission ne sont généralement pas exprimées en unités de volume, mais en mg/m³. La conversion de **ppm** en **mg/m³** s'effectue en multipliant par la **densité** du composant gazeux concerné. Les valeurs devant être indiquées dans des conditions normales (température = 0 °C, pression = 1013 mbar), la conversion s'effectue à l'aide de la densité normale (masse molaire / volume normal), c'est-à-dire la densité dans des conditions normales.

Valeur d'émission [mg/m³] = Densité standard en kg/m³* Valeur d'émission en ppm

CO [mg/m³] = **1,25** kg/m³ * CO [ppm]

$NO_x$ [mg/m³] = **2,05** kg/m³ * $NO_x$ [ppm] ($NO_x$ exprimé en $NO_2$ ≈ 2,05 kg/m³)

HC* [mg/m³] = **0,54** kg/m³ * HC [ppm] (pour $CH_4$ comme gaz d'étalonnage ≈ 0,54 kg/m³)

HC* [mg/m³] = **1,62** kg/m³ * HC [ppm] (pour $C_3H_8$ comme gaz d'étalonnage ≈ 1,62 kg/m³)

* Substances organiques gazeuses, exprimées en carbone total (C)

**Exemple: conversion de la concentration en CO (sans conversion à la teneur en oxygène de référence)**

Valeur mesurée: CO = 200 ppm

Calcul: **CO** [mg/m³] = 1,25 kg/m³ * CO [ppm] = 1,25 kg/m³ * 200 ppm = **250 mg/m³**

## 20.3 Référence en oxygène

Une valeur de référence est nécessaire pour comparer les émissions de différents systèmes de combustion ou de différents essais sur le même appareil. Sans conversion des valeurs d'émission en une valeur de référence, aucune comparaison avec d'autres données n'est possible. La valeur de référence prescrite est la teneur en oxygène $O_2$ dans les gaz d'échappement secs. La teneur en oxygène de référence est spécifique à chaque pays et dépend de la taille de l'installation. Dans l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair), la teneur en oxygène de référence est de 13 % jusqu'à une puissance thermique de combustion de 1 MW et de 11 % au-delà. Dans la norme européenne EN 303-5 pour les installations de combustion au bois, une teneur de référence en oxygène de 10 % s'applique jusqu'à une puissance thermique nominale de 500 kW. Dans la 44e BimSchV, une teneur de référence en oxygène de 6 % s'applique aux installations de combustion au bois de taille moyenne dont la puissance thermique est supérieure à 1 MW.

Tableau 20.2 Conversion de % vol. $O_{2\ référence}$ en $\lambda_{référence}$

| % vol. $O_{2\ référence}$ | $\lambda_{référence}$ |
|---|---|
| 13 | 2,625 |
| 11 | 2,100 |
| 10 | 1 910 |
| 6 | 1 400 |

Les valeurs mesurées doivent être converties à la valeur de référence prescrite, c'est-à-dire aux conditions normales et à la teneur en oxygène de référence. Cela permet d'éviter que la dilution des gaz d'échappement avec de l'air parasite (p. ex. à l'entrée de la cheminée avant le prélèvement d'échantillons pour la mesure des émissions) ne conduise à des valeurs d'émission plus faibles. La conversion permet de convertir les valeurs mesurées en une dilution prédéfinie en fonction de la teneur en oxygène de référence correspondante. La conversion s'effectue selon le schéma suivant :

$$\text{Valeur d'émission } \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right] \text{ avec } \text{O}_{2\ \text{référence}} = \text{Valeur d'émission [ppm]} * \text{Densité normalisée } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right] * \frac{21 - \text{O}_{2\ \text{référence}}\ [\%]}{21 - \text{O}_{2\ \text{mesuré}}\ [\%]}$$

Cela équivaut à une conversion du λ mesuré en λ de la grandeur de référence. Le calcul de λ peut être effectué en mesurant $O_2$ ou $CO_2$. Pour calculer $\lambda_{(référence)}$, on utilise la teneur en oxygène correspondante de la grandeur de référence $O_{2\ référence}$.

$$\text{Valeur d'émission } \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\right] \text{ avec } \text{O}_{2\ \text{référence}} = \text{Valeur d'émission [ppm]} * \text{Densité normalisée } \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right] * \frac{\lambda_{\text{référence}}}{\lambda_{\text{mesuré}}}$$

**Exemple: calcul de la concentration en CO pour une teneur en oxygène de référence**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Grandeurs mesurées: | CO | = | 200 ppm |
| | $O_2$ | = | 9,0 % en volume ($\lambda$ = 1,75) |
| Valeur de référence: | $O_{2\ référence}$ | = | 13 % vol($\lambda_{référence}$ = 2,625) |

Calcul:

$$\text{CO} - \text{Valeur d'émission} = 200\text{ppm} * 1.25\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{21\% - 13\%}{21\% - 9\%} = 167\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\text{bei}13\%\text{O}_2$$

ou

$$\text{CO} - \text{Valeur d'émission} = 200\text{ppm} * 1.25\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1.75}{2.625} = 167\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\text{bei}13\%\text{O}_2$$

**Conversion vers une autre teneur en oxygène de référence**

Selon les exigences légales et les classes de performance, différentes valeurs limites d'émission s'appliquent avec différentes teneurs en oxygène de référence. À l'aide du Tableau 20.3, les valeurs d'émission, exprimées en mg/m³ par rapport à une teneur en oxygène de référence donnée, peuvent être converties en une autre teneur en oxygène de référence courante.

Tableau 20.3 Conversion d'une valeur d'émission vers une autre teneur en oxygène de référence.

| Teneur en oxygène en % vol. | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 140.0 | 133.3 | 126.7 | 120.0 | 113.3 | 106.7 | 100 | 93.3 | 86.7 | 80.0 | 73.3 | 66.7 | 60.0 | 53.3 | 46.7 | 40.0 | 33.3 |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | 190.9 | 181.8 | 172.7 | 163.6 | 154.5 | 145.5 | 136.4 | 127.3 | 118.2 | 109.1 | 100 | 90.9 | 81.8 | 72.7 | 63.6 | 54.5 | 45.5 |
| 11 | 210.0 | 200.0 | 190.0 | 180.0 | 170.0 | 160.0 | 150.0 | 140.0 | 130.0 | 120.0 | 110.0 | 100 | 90.0 | 80.0 | 70.0 | 60.0 | 50.0 |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | 262.5 | 250.0 | 237.5 | 225.0 | 212.5 | 200.0 | 187.5 | 175.0 | 162.5 | 150.0 | 137.5 | 125.0 | 112.5 | 100 | 87.5 | 75.0 | 62.5 |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Exemple de lecture : 100 mg/m3 pour une teneur en oxygène de 10 % en volume correspondent à 90,9 mg/m3 pour 11 % en volume d'O2 et à 136,4 mg/m3 pour 6 % en volume d'O2.

**Exemple: conversion de la valeur d'émission de CO indiquée pour une teneur en oxygène de référence de 11 % en volume en une teneur en oxygène de référence de 6 % en volume**

Valeur initiale: valeur des émissions de CO = 180 mg/m³ rapportée à 11 % en volume d'$O_2$

Selon le Tableau 20.3, on obtient

Valeur des émissions de CO = 100 mg/m³ rapportée à 11 % vol. $O_2$ correspond à

Valeur d'émission de CO = 150 mg/m³ rapportée à 6 % vol. $O_2$

La valeur des émissions de CO convertie à 6 % vol. $O_2$ est donc de :

$$\text{Nouvelle valeur d'émission} = \text{Valeur de départ} * \frac{\text{Nouvelle valeur Tableau 20.3}}{\text{Valeur de départ Tableau 20.3}}$$

$$= 180 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} * \frac{150 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}}{100 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}} = 270 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \text{ avec 6 Vol.} - \%O_2$$

## 20.4 Conversion de mg/m³ en mg/MJ

Pour comparer les charges d'émission de différents combustibles, par exemple le pétrole et le bois, les émissions sont rapportées à la *quantité d'énergie produite* [mg/$MJ_{utile}$ ou mg/$kWh_{utile}$]. Le quotient des émissions et de la quantité d'énergie est également appelé facteur d'émission. Il convient de noter que la quantité d'énergie fournie [mg/$MJ_{final}$] est également utilisée comme valeur de référence. Les deux paramètres sont liés entre eux par le rendement ou le taux d'utilisation annuel.

L'indication des émissions en mg/MJ est courante dans de nombreux pays, de sorte qu'une conversion de mg/m³ en mg/MJ est nécessaire pour la comparaison internationale des valeurs mesurées.

Lors de la conversion de mg/m³ en mg/MJ, il convient de noter que la quantité d'énergie fournie dans le cas d'un chauffage au bois dépend du pouvoir calorifique et donc également de la teneur en eau. Par conséquent, une conversion correcte n'est possible que si le pouvoir calorifique et la teneur en eau sont connus. La conversion en énergie combustible fournie ou en chaleur utile peut alors être effectuée comme suit :

$$Valeur\ d'émission\left[\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{MJ_{final}}}\right] = \text{valeur d'émission}\left[\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{m^3}}\right]\text{bei } \mathrm{O_{2\ référence}} * \frac{\lambda_{\text{référence}} * \mathrm{V_{Lmin}}}{18.3 - 2.442 * \frac{\mathrm{M}}{100 - \mathrm{M}}}$$

$$Valeur\ d'émission\left[\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{MJ_{utile}}}\right] = \frac{\text{Valeur d'émission}\left[\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{MJ_{final}}}\right] * 100\%}{\eta_a}$$

avec :

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\lambda_{référence}$ | = | indice d'excès d'air pour $O_{2référence}$ | [–] |
| $V_{Lmin}$ | = | Quantité stœchiométrique d'air de combustion = 4,58 | [m³ /kg] |
| M | = | teneur en eau | [% en masse] |
| $\eta_a$ | = | Rendement annuel | [%] |

**Exemple : conversion de la concentration en CO de mg/m³ à la teneur en oxygène de référence en mg/MJ**

Valeur initiale :

CO = 100 mg/m³ à 11 % vol.

M = 25 % en masse

$\lambda_{référence}$ = 2,1

$\eta_a$ = 85 %

$$\text{Valeur d'émission CO}\left[\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{MJ}_{final}}\right] = 100 * \frac{2.1 * 4.58}{18.3 - 2.442 * \frac{25}{100 - 25}} = 55\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{MJ}_{final}}$$

$$\text{Valeur d'émission CO}\left[\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{MJ_{utile}}}\right] = \frac{55\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{MJ_{final}}} * 100\%}{85\%} = 65\frac{\mathrm{mg}}{\mathrm{MJ}_{utile}}$$

## 20.5 Conversion des gaz d'échappement humides en gaz d'échappement secs

Sur certains appareils de mesure des émissions, par exemple les appareils de mesure des hydrocarbures basés sur la détection par ionisation de flamme (FID) ou les appareils de mesure du $NO_x$ basés sur la détection par chimiluminescence (CLD), la mesure est effectuée dans des gaz d'échappement chauds et humides, car lors du refroidissement habituel des gaz d'échappement à environ 5 °C dans un refroidisseur de gaz avant l'appareil de mesure des émissions, une partie des substances à mesurer se transforme en condensat liquide et fausse ainsi la valeur mesurée par l'appareil. Étant donné que les valeurs limites d'émission s'appliquent aux gaz d'échappement secs dans des conditions normales (0 °C, 1013 mbar), il est nécessaire, lors de la mesure dans les gaz d'échappement humides, de procéder à une conversion en gaz d'échappement secs, sinon la vapeur d'eau entraîne une dilution des émissions. Lors des mesures de vitesse dans des gaz d'échappement chauds et humides, il faut procéder, outre à la correction de l'humidité, à une compensation de la température et de la pression.

Le facteur de conversion f peut être calculé à partir du nombre d'excès d'air λ (dans les gaz d'échappement secs) et de la teneur en eau M selon l'équation suivante [54]:

$$\text{Facteur de conversion f} = \frac{\text{Débit gaz de combustion humides}}{\text{Débit gaz de combustion secs}}$$

$$Facteur\ de\ conversion\ f = 1 + \frac{0.287}{\lambda} * \left(\frac{M}{100 - M} + 0.512\right)$$

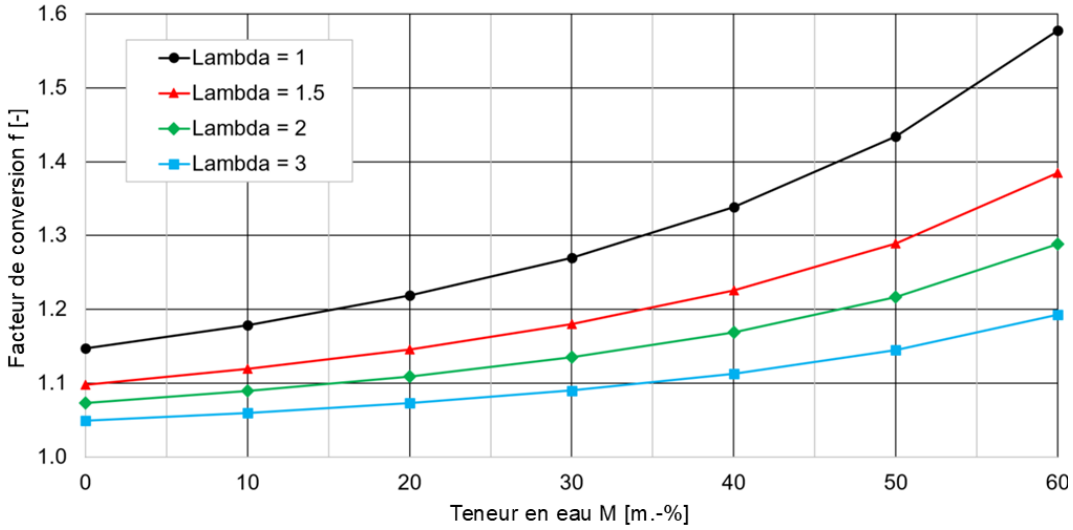



Figure 20.1 Facteur de conversion f en fonction de la teneur en eau M.

**Exemple: conversion de la concentration en hydrocarbures des gaz d'échappement humides en gaz d'échappement secs**

| | | |
|---|---|---|
| Valeurs mesurées: | Concentration d'hydrocarbures dans gaz d'échappement humides $HC_{humide}$ | = 100 ppm |
| | Teneur en eau M | = 35 % en masse |
| | Oxygène ($O_2$) | = 7.0 % en volume (λ = 1,5) |
| Teneur en oxygène de référence $O_{2réf}$ | | = 11 % en volume ($\lambda_{référ.}$ = 2,1) |
| Facteur de conversion f tiré de la Figure 20.1 | | = 1,2 |
| Gaz d'étalonnage propane ($C_3 H_8$), densité normalisée | | = 1,62 kg/m³ |

Calcul :

$$\text{HC} = \text{HC}_{humide} * \text{f} * \text{Densité normalisée} * \frac{\lambda}{\lambda_{\text{référence}}} = 100\text{ppm} * 1.2 * 1.62\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1.5}{2.1} = 139\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}\text{à}11\%O_2$$

**Remarque:** pour de nombreux appareils de mesure disponibles dans le commerce basés sur la détection IR et UV pour le CO, le $NO_x$, le $CO_2$, ainsi que sur le paramagnétisme pour l'$O_{(2)}$, la mesure est effectuée dans les gaz d'échappement secs, la conversion des gaz d'échappement humides en gaz d'échappement secs n'est donc pas nécessaire dans ce cas.

## 20.6 Détermination de la puissance thermique nominale

La puissance thermique nominale est la puissance thermique transmise par une installation de combustion à l'eau de la chaudière lorsque la combustion fonctionne à sa puissance nominale. Elle peut être mesurée directement à l'aide d'un compteur de chaleur :

$$\dot{Q}_N = (T_{VL} - T_{RL}) * c_{pW} * \dot{m}_W$$

La puissance thermique nominale peut également être déterminée à partir du rendement de la chaudière, du pouvoir calorifique et du débit massique du combustible brûlé :

$$\dot{Q}_N = \eta_k * H_U * \dot{m}_B$$

Si le débit massique du combustible brûlé n'est pas connu, il peut être déterminé indirectement en mesurant l'excès d'air et le débit volumique de l'air de combustion ou des gaz d'échappement secs.

$$\dot{m}_B = \frac{\dot{V}_{AGtr} * \left(1 + \frac{M}{100 - M}\right)}{\lambda * V_{Lmin}}$$

Suivi

$$\dot{Q}_N = \eta_k * H_U * \frac{\dot{V}_{AGtr} * \left(1 + \frac{M}{100 - M}\right)}{\lambda * V_{Lmin}}$$

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| avec : | $\dot{Q}_N$ | = | puissance thermique nominale | [kW] |
| | $T_{VL}$ | = | Température de départ | [°C] |
| | $T_{RL}$ | = | Température de retour | [°C] |
| | $c_{pw}$ | = | Capacité thermique spécifique de l'eau = 4 182 | [kJ/kg K] |
| | $\dot{m}_W$ | = | Débit massique de l'eau (de chaudière) | [kg/s] |
| | $\eta_k$ | = | Rendement de la chaudière | [–] |
| | $H_u$ | = | Pouvoir calorifique | [kJ/kg] |
| | $\dot{m}_B$ | = | Débit massique du combustible humide | [kg/s] |
| | $\dot{V}_{AGtr}$ | = | Débit volumique des gaz d'échappement secs | [$m^3$ /s] |
| | M | = | Teneur en eau | [% en masse] |
| | $\lambda$ | = | Indice d'excès d'air | [–] |
| | $V_{Lmin}$ | = | Volume stœchiométrique d'air de combustion = 4,58 | [$m^3$ /$kg_{atro}$ ] |

Le débit volumique des gaz d'échappement secs ne peut pas être mesuré directement. La mesure de la vitesse, par exemple à l'aide d'un tube de Pitot et en connaissant la composition des gaz d'échappement, fournit le débit volumique des gaz d'échappement humides. La conversion en gaz d'échappement secs nécessite de connaître l'humidité des gaz d'échappement, qui est déterminée soit dans les gaz d'échappement, soit à partir de l'humidité du bois.

## 20.7 Détermination du débit massique du combustible

Le débit massique du combustible humide en kilogrammes par heure est donné par la puissance thermique nominale d'une installation de combustion, le rendement de la chaudière $\eta_k$ et le pouvoir calorifique $H_u$ :

$$\dot{m}_B = \frac{\dot{Q}_N}{\eta_k * H_u} = \frac{3600}{1000} * \frac{\dot{Q}_N}{\eta_k} * \frac{1 + \frac{M}{100 - M}}{18.3 - 2.442 \frac{M}{100 - M}}$$

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Avec : | $\dot{m}_B$ | = | débit massique du combustible humide | [kg/h] |
| | $\dot{Q}_N$ | = | Puissance thermique nominale | [kW] |
| | $\eta_k$ | = | Rendement de la chaudière | [–] |
| | $H_u$ | = | Pouvoir calorifique | [MJ/kg] |
| | M | = | Teneur en eau | [% en masse] |

Le débit massique de combustible nécessaire pour produire la puissance thermique nominale souhaitée dépend essentiellement de la teneur en eau ou du pouvoir calorifique du combustible.

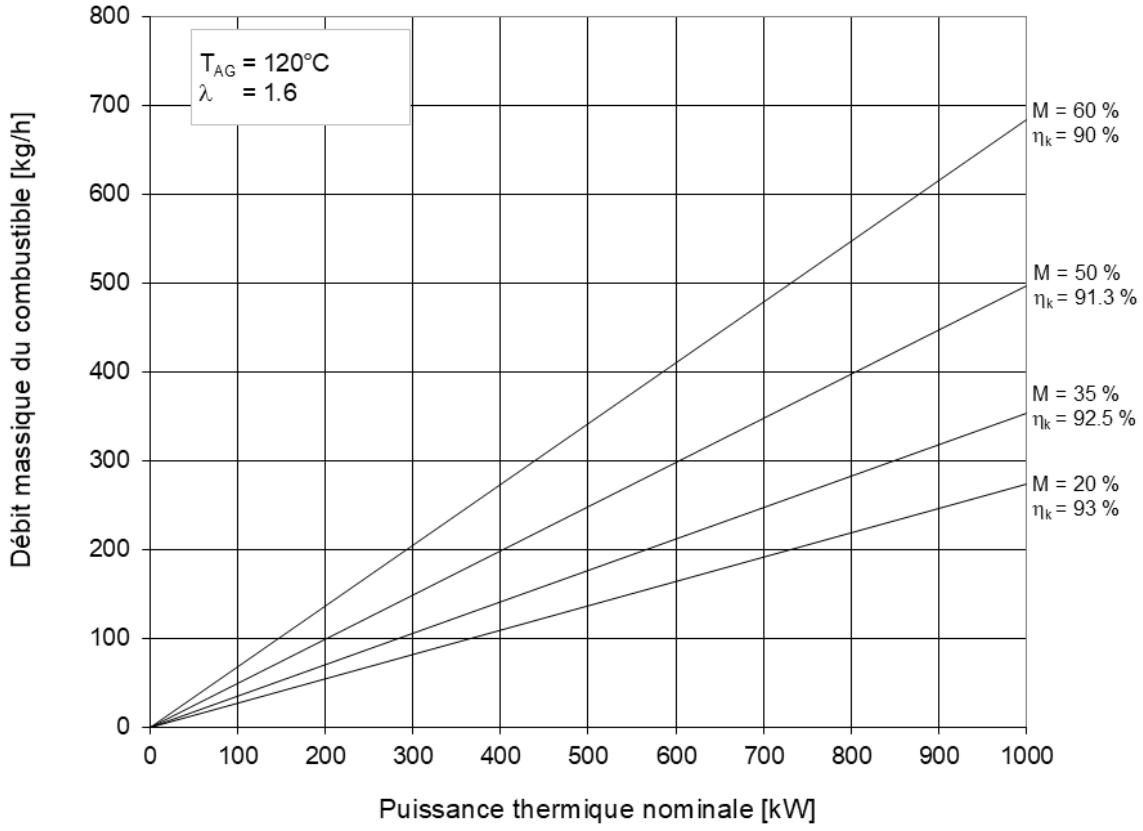



Figure 20.2 Débit massique de combustible en fonction de la puissance thermique nominale

## 20.8 Détermination de la quantité d'air de combustion

La quantité d'air de combustion, c'est-à-dire le débit volumique de l'air de combustion, correspond approximativement au débit volumique des gaz d'échappement secs :

$$\dot{V}_L \approx \dot{V}_{AGtr}$$

Il en résulte, selon le chapitre 20.6 :

$$\dot{V}_L = \frac{\dot{Q}_N * 100\%}{\eta_k} * \frac{\lambda * V_{Lmin}}{18.3 - 2.442 \frac{M}{100 - M}} * \frac{3600}{1000}$$

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Avec : | $\dot{V}_L$ | = | Quantité d'air de combustion | [$m^3$ /h] |
| | $\dot{V}_{AGtr}$ | = | débit volumique des gaz d'échappement secs | [$m^3$ /h] |
| | $\dot{Q}_N$ | = | Puissance thermique nominale | [kW] |
| | $\eta_k$ | = | Rendement de la chaudière | [%] |
| | M | = | Teneur en eau | [m.-%] |
| | λ | = | Indice d'excès d'air | [–] |
| | $V_{Lmin}$ | = | Volume stœchiométrique d'air de combustion = 4,58 | [$m^3$ /$kg_{atro}$] |

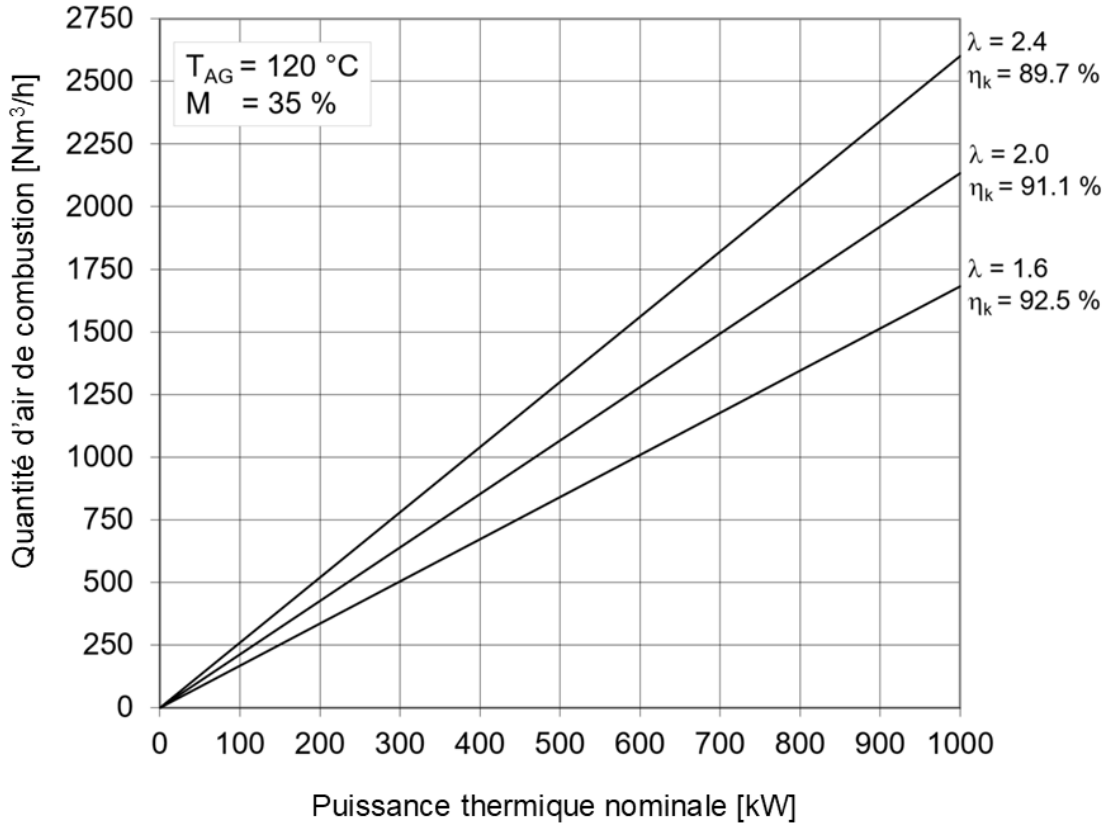



Figure 20.3 Quantité d'air de combustion en fonction de la puissance thermique nominale et de l'indice d'excès d'air

La quantité d'air de combustion nécessaire pour produire une puissance thermique nominale souhaitée dépend à peu près autant du nombre d'excès d'air que du pouvoir calorifique ou de la teneur en eau.

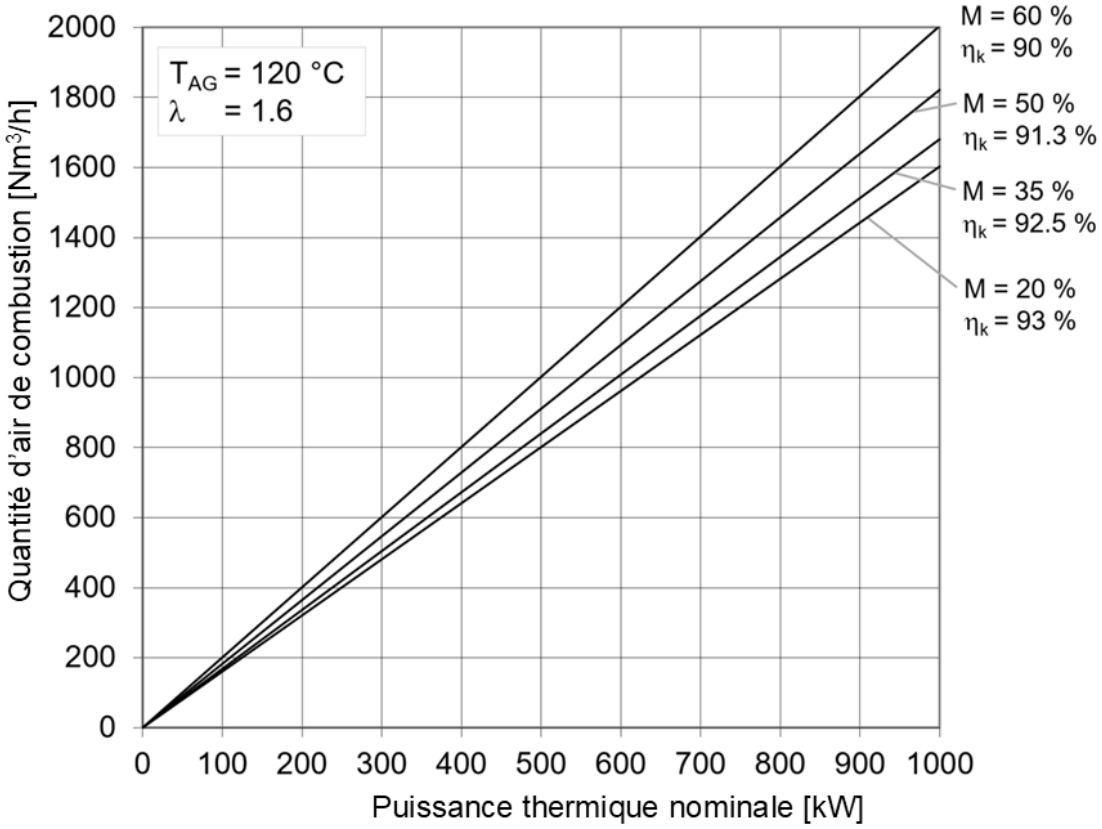



Figure 20.4 Quantité d'air de combustion en fonction de la puissance thermique nominale et de la teneur en eau

## 20.9 Détermination du débit volumique des gaz de combustion

Le débit volumique des gaz d'échappement d'un chauffage au bois correspond, à l'état sec et dans des conditions normales (0 °C et 1013 mbar), à peu près à la quantité d'air de combustion nécessaire pour produire une puissance thermique nominale donnée.

$$\dot{V}_{AGtr} \approx \dot{V}_L \quad \left[\frac{m^3}{h}\right]$$

Le débit volumique des gaz de combustion en état de fonctionnement, c'est-à-dire des gaz de combustion humides à la température des gaz de combustion et à la pression ambiante, peut être déterminé en convertissant les gaz de combustion secs en gaz de combustion humides (voir chap. 20.5) et en convertissant les conditions normales en conditions de fonctionnement :

$$\dot{V}_{AG} = \dot{V}_L * f * \frac{(273 + T_{AG}) * 1'013}{273 * p} \quad \left[\frac{m^3}{h}\right]$$

avec :

| | | | |
|---|---|---|---|
| $\dot{V}_L$ | = | quantité d'air de combustion | [$m^3$ /h] |
| $\dot{V}_{AGtr}$ | = | Débit volumique des gaz d'échappement, sec, dans des conditions normales | (0°C, 1’013 mbar) [$m^3$ /h] |
| $\dot{V}_{AG}$ | = | Débit volumique des gaz d'échappement, humides, dans les conditions de fonctionnement | ($T_{AG}$ et p) [$m^3$ /h] |
| f | = | Facteur de conversion, gaz d'échappement humide en gaz d'échappement sec | [–] |
| $T_{AG}$ | = | Température des gaz d'échappement | [°C] |
| p | = | Pression ambiante | [mbar] |

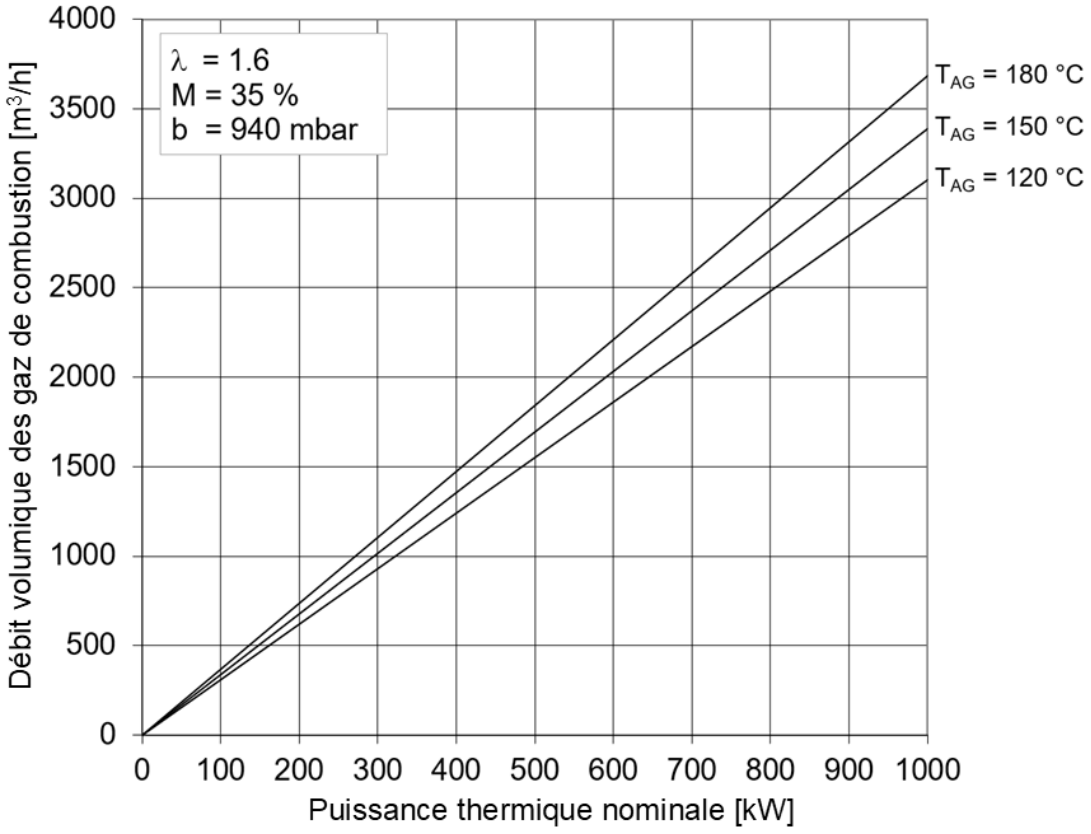



Figure 20.5 Débit volumique des gaz d'échappement en état de fonctionnement en fonction de la puissance thermique nominale

## 20.10 Détermination du débit massique de $NO_x$

En règle générale, les oxydes d'azote ($NO_x$) ne doivent respecter une valeur limite d'émission que lorsqu'ils dépassent un débit massique $NO_x$ prédéterminé. En Suisse, par exemple, une valeur limite d'émission de 250 mg/m$^3$ (pour une teneur en oxygène de référence) est fixée dès que le débit massique de $NO_x$ dépasse 2 500 g/h. Lors de la phase de planification d'une centrale de chauffage au bois, il est donc important d'estimer le débit massique de $NO_x$ afin de pouvoir décider si un procédé de réduction des $NO_x$ sera nécessaire (voir chap.13.9.2).

Le débit massique de $NO_x$ est calculé à partir du débit volumique des gaz d'échappement à la puissance nominale et de la concentration de $NO_x$ à la teneur en oxygène mesurée :

$$\dot{N}O_x = \dot{V}_{AGtr} * \frac{NO_x}{1'000} \qquad \left[\frac{g}{h}\right]$$

Si la concentration en $NO_x$ pour la teneur en oxygène mesurée n'est pas connue, elle peut être estimée à partir d'une concentration en $NO_x$ pour la teneur en oxygène de référence et en supposant une teneur en oxygène comme suit :

$$NO_x = NO_{x\,O_2\,Bezug} * \frac{21 - O_2}{21 - O_{2Bezug}} \qquad \left[\frac{mg}{m^3}\right]$$

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| avec : | $\dot{N}O_x$ | = | débit massique de $NO_x$ | [g/h] |
| | $\dot{V}_{AGtr}$ | = | Débit volumique des gaz d'échappement, sec, à 0 °C, 1 013 mbar | [m$^3$ /h] |
| | $NO_x$ | = | Concentration de $NO_x$ dans les gaz d'échappement secs pour une teneur en oxygène mesurée | [mg/m$^3$] |
| | $NO_{xO2\ référence}$ | = | Concentration de $NO_x$ dans les gaz d'échappement secs pour une teneur en oxygène de référence | [mg/m$^3$] |
| | $O_2$ | = | Teneur en oxygène (mesurée à la puissance nominale) | [% vol.] |
| | $O_{2\ référence}$ | = | Teneur en oxygène de référence | [% vol.] |

ENplus® GD AT 3001:2024 Guide ENplus® Stockage des granulés de bois

ENplus® GD AT 3001:2024 Guide ENplus® pour le stockage des granulés de bois

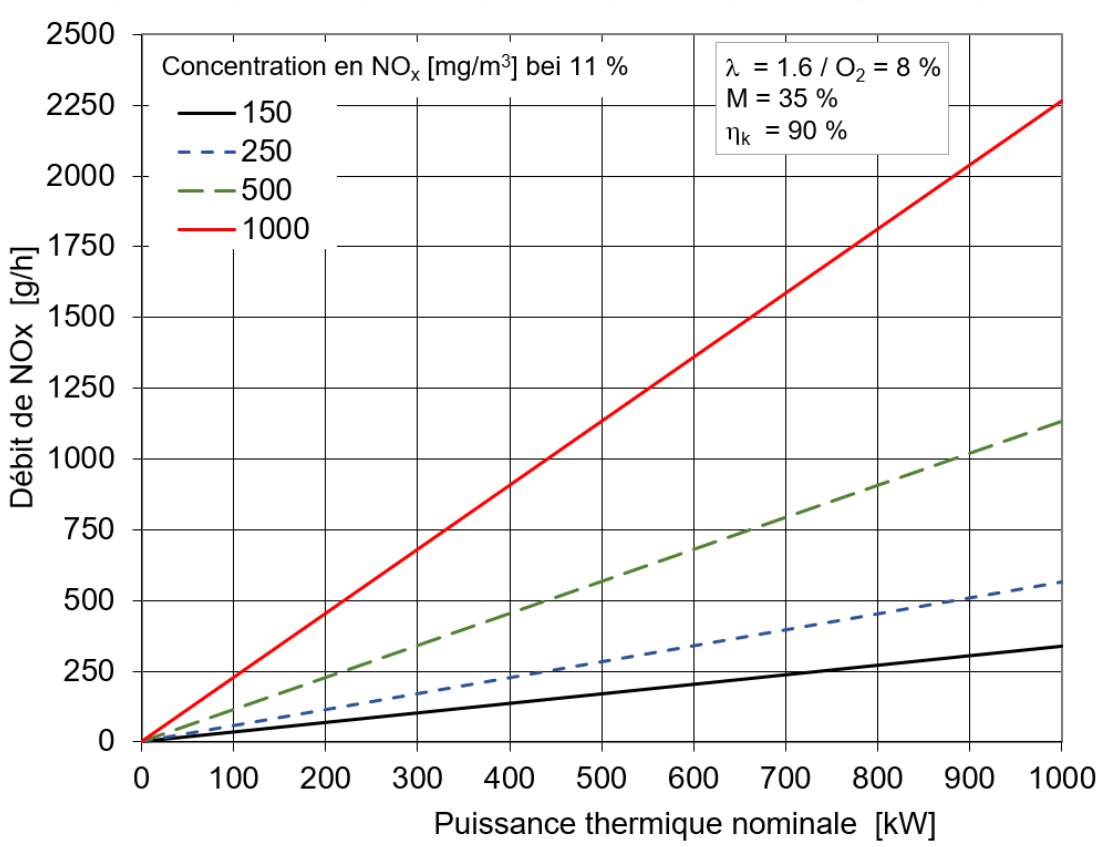



Figure 20.6 Débit massique de $NO_x$ en g/h en fonction de la puissance therm. nom. en kW et de différentes concentrations de $NO_x$.

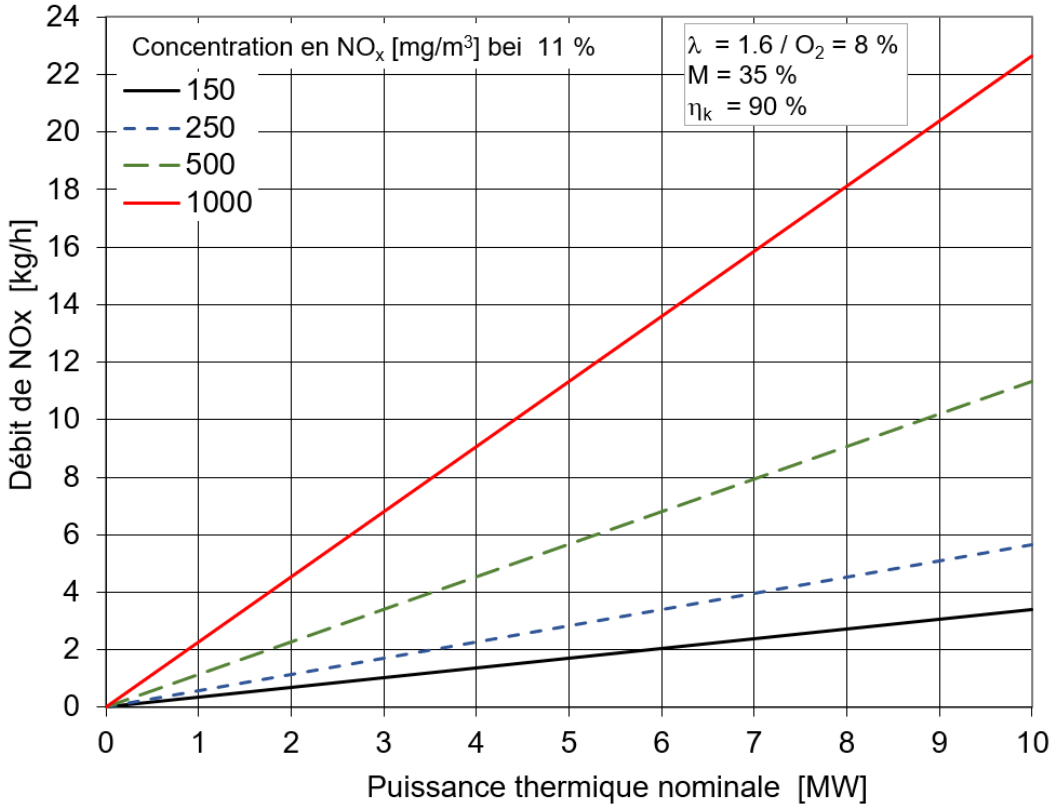



Figure 20.7 Débit massique de $NO_x$ en kg/h en fonction de la puissance therm. nom. en MW et de différentes concentr. de $NO_x$.

## 20.11 Détermination du rendement de combustion

Pour calculer le rendement de combustion, on détermine le contenu énergétique des différents composants des gaz de combustion. À partir de l'équation de combustion du bois, on peut calculer les pertes thermiques et chimiques des gaz de combustion. Nussbaumer et Good [60] ont dérivé une formule simplifiée pour les combustibles à base de bois, qui offre une précision suffisante pour les applications techniques. Dans la plage CO < 0,5 % vol., $CO_2$ > 5 % vol., température des gaz de combustion < 400 °C, le rendement de combustion des foyers à bois est alors le suivant :

$$\eta_f = 100 - V_{therm} - V_{chem} \quad [\%]$$

Où : $V_{therm}$ = pertes thermiques dues à la chaleur sensible des gaz d'échappement [%]

$V_{chem}$ = pertes chimiques dues à une combustion incomplète [%]

$$V_{therm} = \frac{(T_A - T_U) * \left(1.39 + \frac{122}{CO_2 + CO} + 0.02 * \frac{M}{100 - M} * 100\right)}{\frac{18'300}{100} - 0.2442 * \frac{M}{100 - M} * 100} \quad [\%]$$

$$V_{chem} = \frac{CO}{CO_2 + CO} * \frac{11'800}{\frac{18'300}{100} - 0.2442 * \frac{M}{100 - M} * 100} \quad [\%]$$

Lambda λ : $\lambda = \frac{21}{21 - O_2 + 0.4\,CO} = \frac{20.4}{CO_2 + CO}$ [–]

Si $O_2$ est mesuré à la place de $CO_2$ : $CO_2$ = 0,98 (21 - $O_2$) - 0,61 CO [% vol.]

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Avec : | $T_A$ | = | température des gaz d'échappement | [°C] |
| | $T_U$ | = | Température ambiante | [°C] |
| | $O_2$ | = | Concentration en oxygène | [% vol.] |
| | $CO_2$ | = | Concentration en dioxyde de carbone | [% vol.] |
| | CO | = | Concentration en monoxyde de carbone | [% vol.] |
| | u | = | Humidité du bois par rapport à du bois absolument sec | [m.-%] |
| | M | = | Teneur en eau du bois humide | [m.-%] |
| | λ | = | Indice d'excès d'air | [–] |

Remarque : pour calculer l'humidité du bois (humidité du bois) u à partir de la teneur en eau M, on peut utiliser la conversion suivante :

$$u = \frac{\frac{M}{100}}{1 - \frac{M}{100}} \quad [-]; \; u = \frac{M}{100 - M} * 100 \quad [m.-\%]$$

ou

$$M = \frac{\frac{u}{100}}{1 + \frac{u}{100}} \quad [-]; \; M = \frac{u}{100 + u} * 100 \quad [m.-\%]$$

Cette méthode fournit des valeurs comparables à celles obtenues avec le calcul selon la norme DIN EN 14394:2008-12 [147]. La formule peut être adaptée si nécessaire pour les combustibles dont la composition diffère de celle du bois [60]. Une estimation rapide des valeurs numériques peut également être effectuée graphiquement à l'aide des nomogrammes correspondants (Figure 20.8).

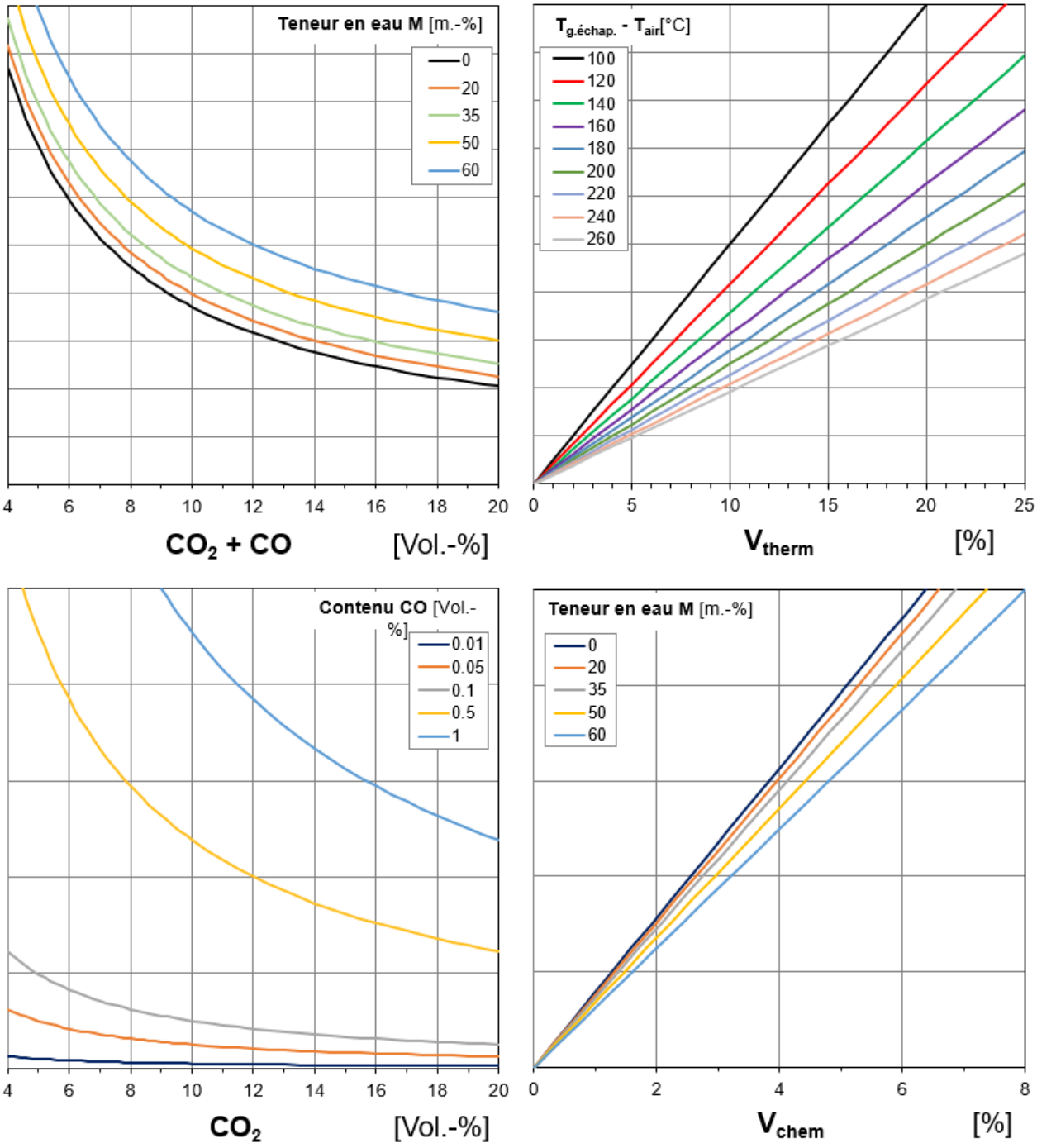



Figure 20.8 Nomogrammes pour déterminer le rendement de combustion avec $\eta_f = 100 - V_{therm} - V_{chem}$ [%]

# 20.12 Détermination du rendement annuel

Le mode de calcul suivant permet de déterminer le rendement annuel $\eta_a$ avec une précision d'environ ± 5 %, à condition qu'un compteur de chaleur soit installé dans le circuit de la chaudière. Le rendement annuel dépend des pertes, du taux d'utilisation α et du niveau de charge moyen L de l'installation de combustion. Le calcul se base sur une combustion dont le rendement de la chaudière $\eta_k$ basé sur des paramètres de fonctionnement moyens. Pour les installations de combustion avec d'autres paramètres de fonctionnement, le rendement de la chaudière $\eta_k$ est ajusté à l'aide de termes de correction. Le taux d'utilisation α, le rendement de la chaudière $\eta_k$ et le niveau de charge moyen L permettent de calculer le taux d'utilisation annuel $\eta_a$ ([137], [148]).

On suppose que le rendement de la chaudière $\eta_k$ est constant sur toute la plage de charge. La part relative plus élevée des pertes par rayonnement en fonctionnement à charge partielle est compensée par des températures de gaz d'échappement plus basses.

**Taux d'utilisation temporel α**

$$\alpha = \frac{\text{Durée d'exploitation de la combustion}}{\text{Durée d'enclenchement de la combustion}} = \frac{t_{exploitation}}{t_{EN}} [-]$$

La durée de fonctionnement comprend le temps de fonctionnement normal et le temps de veille (entretien du lit de braises) d'une installation de combustion entre l'allumage au début de la période de chauffage et l'arrêt à la fin de la période de chauffage. Le temps de fonctionnement et le temps de veille sont généralement enregistrés à l'aide d'un compteur d'heures de fonctionnement ou via la commande API.

**Rendement de la chaudière $\eta_k$**

Le rendement de la chaudière $\eta_k$ est le suivant pour une chaudière à plaquettes de bois automatique avec les paramètres de fonctionnement suivants :

| Paramètres de fonctionnement : | | | |
|---|---|---|---|
| Température des gaz d'échappement | $T_{AG}$ | = | 120 °C |
| Indice d'excès d'air | λ | = | 1,6 |
| Teneur en eau | M | = | 38 % en poids |
| Humidité du bois | u | = | 60 % atro |
| Rendement de combustion | $\eta_f$ | = | 93 % (nomogramme dans la Figure 20.8) |
| Pertes par rayonnement | $q_s$ | = | 1,5 |
| Rendement de la chaudière | $\eta_k$ | = | $\eta_f$ – qs = 93 – 1,5 = 91,5 % |

Une éventuelle différence entre les pertes par rayonnement réelles et supposées $q_s$ de 1,5 % peut être directement ajoutée ou soustraite au rendement de la chaudière $\eta_k$. Si les pertes par rayonnement $q_s$ ne sont pas connues, on peut supposer approximativement qu'elles correspondent à la moitié des pertes à l'arrêt $q_B$. Pour les autres paramètres de fonctionnement, les corrections suivantes s'appliquent :

| | | |
|---|---|---|
| Par Δ u = 10 % | bois plus humide | 0,4 % de rendement de chaudière en moins $\eta_k$ |
| Par Δ λ = 0,1 | excès d'air plus important | 0,6 % de rendement de chaudière $\eta_k$ en moins |
| Par $\Delta T_{AG}$ = 10 °C | température des gaz d'échappement plus élevée | 1,0 % de rendement de chaudière $\eta_k$ en moins |

Les termes de correction s'appliquent également dans le sens inverse.

**Niveau de charge moyen L**

Le niveau de charge moyen L, auquel le foyer fonctionne en moyenne pendant la durée de fonctionnement, peut être calculé comme suit :

$$L = \frac{\Delta WZ * 100\%}{\dot{Q}_N * t_{exploitation}} [\%]$$

Avec :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Δ WZ | = | Valeur finale du compteur de chaleur - valeur initiale du compteur de chaleur | [kWh] |
| $t_{exploitation}$ | = | Durée d'exploitation de la combustion | [h] |
| $\dot{Q}_N$ | = | Puissance thermique nominale | [kW] |

### Pertes en veille $q_B$

Les pertes à l'arrêt surviennent pendant les phases de veille, c'est-à-dire après chaque arrêt d'une chaudière à bois. Elles comprennent les pertes dues au refroidissement de la chaudière à bois et à la consommation de combustible (entretien du lit de braises) afin de maintenir la chaudière à bois à une température opérationnelle. Les pertes à l'arrêt sont moins importantes pour les chaudières à bois de construction légère sans entretien du lit de braises (appareils de série à allumage automatique) et plus importantes pour les chaudières à bois de construction lourde avec entretien du lit de braises (chaudières industrielles).

Pour une installation moderne de taille moyenne, les pertes à l'arrêt $q_B$ s'élèvent à environ 3 %. Les données du Tableau 20.4 peuvent être utilisées comme valeurs indicatives pour d'autres tailles d'installations.

Tableau 20.4 Valeurs indicatives pour les pertes à l'arrêt $q_B$.

| Type de combustion | Pertes de disponibilité $q_B$ |
|---|---|
| Appareil de série jusqu'à 300 kW | $q_B \geq 1\ \% - 3\ \%$ |
| Chaudières industrielles jusqu'à 300 kW | $q_B \geq 3\ \% - 5\ \%$ |
| Chaudières industrielles > 300 kW | $q_B \geq 1\ \% - 3\ \%$ |

### Rendement annuel $\eta_a$

À partir du taux d'utilisation α, du rendement de la chaudière $\eta_k$, des pertes à l'arrêt $q_B$ et du niveau de charge moyen L, le rendement annuel $\eta_a$ peut être calculé à l'aide de la formule ci-dessous (voir la Figure 20.9) :

$$\eta_a = \eta_k \frac{1}{1 + \frac{q_B * (1 - \alpha)}{L * \alpha}} \quad [\%]$$

Avec : α = Taux d'utilisation temporel [–]

$\eta_k$ = Rendement de la chaudière [%]

$q_B$ = Pertes à l'arrêt [%]

L = niveau de charge moyen [%]

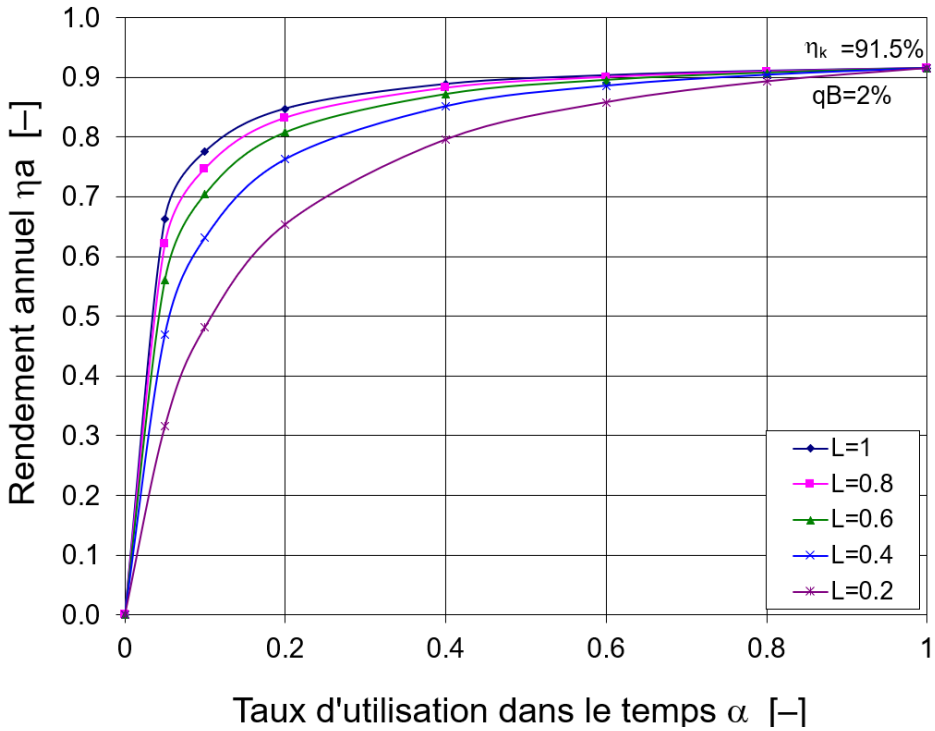



Figure 20.9 Rendement annuel d'une chaudière à bois en fonction de son utilisation dans le temps[148] avec $\eta_k$ : rendement de la chaudière ; $q_B$ : pertes à l'arrêt ; L : niveau de charge moyen.

**Exemple de calcul**

| **Compteur de chaleur** | **Chauffage** | |
|---|---|---|
| Différence relevée sur le compteur de chaleur | Puissance thermique nominale | 700 kW |
| pendant une période de chauffage | Indice d'excès d'air | λ = 1,6 |
| Δ WZ = 997 647 kWh | Température des gaz d'échappement | $T_{AG}$ = 120 °C |
| | Humidité du bois | u = 60 % |
| | Teneur en eau | M = 38 % en masse |
| | Pertes par rayonnement | $q_s$ = 1,5 % |
| | Pertes de disponibilité | $q_B$ = 2,0 % |
| | Durée de fonctionnement | Période de chauffage |
| | Durée de fonctionnement | 2 036 h |

**Calcul du taux d'utilisation dans le temps α :**

Durée d'enclenchement de la combustion : Période de chauffage : du 15 septembre au 4 avril = 202 jours = 4 848 h ; durée d'exploitation : 2 036 h

$$\alpha = \frac{\text{Durée d'exploitation de la combustion}}{\text{Durée d'enclenchement de la combustion}} = \frac{2'036\text{h}}{4'848\text{h}} = 0.42$$

**Détermination du rendement de la chaudière $\eta_k$ :**

| | | |
|---|---|---|
| Rendement technique de combustion | $\eta_f$ | = 93 % (détermination à l'aide du nomogramme de la Figure 20.8) |
| Pertes par rayonnement | $q_s$ | = 1,5 % |
| Rendement de la chaudière | $\eta_k$ | = 93 % – 1,5 % = 91,5 % |

**Calcul du niveau de charge moyen L :**

$$L = \frac{\Delta WZ * 100\%}{\dot{Q}_N * t_{exploitation}} = \frac{997'647\text{kWh} * 100\%}{700\text{kW} * 2'036\text{h}} = 70\%$$

**Calcul du rendement annuel $\eta_a$**

$$\eta_a = \eta_k \frac{1}{1 + \frac{q_B * (1 - \alpha)}{L * \alpha}} = 91.5\% * \frac{1}{1 + \frac{2\% * (1 - 0.42)}{70\% * 0.42}} = 88\%$$

# 20.13 Unités courantes et conversions

Tableau 20.5 Unités de mesure courantes pour le bois énergie. Conversion, voir le Tableau 20.6.

| Symbole | Signification |
|---|---|
| $m^3$ | Mètre cube (masse de bois solide sans espace), 1 $m^3p$ = 1 $m^3$ ≈ 2,5 ... 2,8 $m^3v$ |
| $m^3p$ | Mètre cube plein (masse de bois solide sans espace), 1 $m^3p$ = 1 $m^3$ ≈ 2,5 ... 2,8 $m^3v$ |
| $m^3v$ | Mètre cube en vrac (mètre cube de plaquettes, mètre cube de copeaux)) |
| stère ($m^3a$) | Mètre cube apparent de bûches de 1 m empilées (avec espaces) = 0,7 $m^3p$ |

Tableau 20.6 Tableau de conversion (valeurs indicatives pour le bois avec M = 15 %).

| | Bois tendre WH<br>Fi/Ta | Bois dur HH<br>Bu |
|---|---|---|
| Bois rond | 2,5 ... 2,8 $m^3v$ | 2,5 ... 2,8 $m^3v$ |
| 1 mètre cube plein ($m^3p$) correspond à | 1,4 $m^3a$ (stère) | 1,4 $m^3a$ (stère) |
| | 550 kg de bois | 750 kg de bois |
| | 200 litres de mazout extra léger | 280 litres de mazout extra léger |
| | 2 000 kWh 7 200 MJ | 2 800 kWh 10 080 MJ |
| Plaquettes de bois | 0,36 $m^3$ ($m^3p$) | 0,36 $m^3$ ($m^3p$) |
| 1 mètre cube de plaquettes ($m^3v$) correspond à | 0,5 $m^3a$ (stère) | 0,5 $m^3a$ (stère) |
| | 160 - 200 kg de bois | 250 - 270 kg de bois |
| | 70 litres de mazout extra léger | 100 litres de mazout extra léger |
| | 700 kWh 2 520 MJ | 1000 kWh 3 600 MJ |

Tableau 20.7 Préfixes et signes préfixés

| | | |
|---|---|---|
| **Kilo** | **k** | $10^3$ |
| **Méga** | **M** | $10^6$ |
| **Giga** | **G** | $10^9$ |
| **Téra** | **T** | $10^{12}$ |
| **Péta** | **P** | $10^{15}$ |
| **Exa** | **E** | $10^{18}$ |

| | |
|---|---|
| **Mégawattheure :** | 1 MWh = 1 000 kWh |
| Gigawattheure : | 1 GWh = 1 million de kWh |
| Térawattheure : | 1 TWh = 1 milliard de kWh |

Tableau 20.8 Unités pour l'énergie et la puissance

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Joule** | **J** | Pour l'énergie, le travail, la quantité de chaleur | Unité légale obligatoire en Allemagne depuis 1978. La calorie et les unités dérivées telles que l'unité charbon et l'unité pétrole brut sont encore utilisées à titre auxiliaire. |
| **Watt** | **W** | Pour la puissance, le flux d'énergie, le flux thermique | |

1 joule (J) = newton-mètre (Nm) = 1 watt-seconde (Ws)

Tableau 20.9 Facteurs de conversion pour les unités d'énergie

| | | kJ | kcal | kWh |
|---|---|---|---|---|
| **1 kilojoule** | kJ | 1 | 0,2388 | 0,000278 |
| **1 kilocalorie** | kcal | 4,1868 | 1 | 0,001163 |
| **1 kilowattheure** | kWh | 3 600 | 860 | 1 |
| **1 kg d'unité de charbon** | SKE | 29 308 | 7 000 | 8,14 |
| **1 kg d'unité de pétrole brut** | RÖE | 41 868 | 10 000 | 11,63 |

Les chiffres se réfèrent au pouvoir calorifique.

# 21 Glossaire (CTRL+F)

| Termes | Signification |
|---|---|
| Chaleur fatale (chaleur résiduelle) | La chaleur fatale désigne les flux thermiques générés comme sous-produits de processus, qui ne sont pas utilisés et sont souvent rejetés dans l'environnement avec une consommation d'énergie supplémentaire pour les pompes, les ventilateurs, les refroidisseurs ou les installations frigorifiques, contribuant ainsi à un réchauffement indésirable (voir chapitre 13.7.5). |
| Densité de raccordement (charge thermique) | La densité de raccordement (voir chapitre 12.2.6) est le rapport entre la quantité de chaleur vendue annuellement en MWh/a et la longueur totale en mètres des conduites principales, des conduites de dérivation et des conduites de raccordement domestiques. La densité de raccordement peut également être calculée pour des sous-réseaux ou des tronçons de réseau individuels et utilisée à des fins d'évaluation. |
| Puissance de raccordement (abonnée) | La puissance de raccordement ou puissance connectée souscrite est la puissance thermique maximale convenue contractuellement pour un consommateur de chaleur (client ou cliente) raccordé à un réseau de chauffage à distance.<br>La puissance de raccordement (ou puissance connectée totale) d'un réseau de chauffage à distance est la somme des puissances raccordées de tous les consommateurs de chaleur. |
| Exécution | Phase du projet au cours de laquelle la réalisation de l'installation a lieu. Au cours de l'exécution/la réalisation, une surveillance professionnelle des travaux ou une supervision locale des travaux doit être effectuée. |
| Appel d'offres et attribution | Phase du projet au cours de laquelle le projet d'appel d'offres est publié et attribué. Le terme « planification de l'appel d'offres » est également couramment utilisé à cet effet. Cela comprend la préparation et l'envoi des documents d'appel d'offres, la préparation de l'attribution (comparaison des offres, tableau des prix) et la participation à l'attribution. L'appel d'offres est basé sur le projet d'appel d'offres, qui représente l'état d'avancement de la planification de l'installation au moment de l'appel d'offres. |
| Charge de base (charge minimale, couverture de la charge de base) | La charge de base désigne la puissance nécessaire en permanence, c'est-à-dire pendant toute la durée de fonctionnement (saison de chauffage ou année entière (8760 heures)). La charge de base d'un réseau de chauffage à distance se compose des besoins en puissance des consommateurs indépendants de la saison (par exemple pour la production d'eau chaude, la chaleur industrielle, etc.) et des pertes du réseau.<br>La couverture de la charge de base désigne une unité de production de chaleur qui est principalement utilisée pour couvrir la charge de base (par exemple, une installation de cogénération). |
| Optimisation de l'exploitation | L'optimisation de l'exploitation consiste à vérifier et à optimiser systématiquement le fonctionnement de l'installation après sa remise au maître d'ouvrage. Pour QM Chauffages au bois, l'optimisation de l'exploitation relève de la responsabilité des entreprises exécutantes sous la direction du planificateur principal (voir chapitre18 ). |
| Biomasse (combustibles bois) | La biomasse comprend toutes les substances organiques produites par les plantes, les animaux et les êtres humains. La biomasse à des fins énergétiques provient de l'agriculture, de la sylviculture et des résidus biogènes (déchets). La biomasse adaptée à la combustion est appelée combustible solide biogène. Il s'agit de la biomasse ligneuse (résidus forestiers, bois de faible diamètre, résidus industriels, etc.), de la biomasse herbacée (paille, etc.) et d'autres types de biomasse (plantes céréalières entières, coques, graines, etc.). Contrairement à la combustion, la biomasse peut également être utilisée à des fins énergétiques par fermentation. À cette fin, on utilise de la biomasse fermentable, c'est-à-dire non ligneuse, telle que le lisier, le fumier, l'ensilage de maïs et d'herbe, ainsi que divers résidus biogènes provenant de l'agriculture, de l'industrie alimentaire et même des biodéchets. |
| Production de chaleur bivalente | Production de chaleur à partir d'au moins deux sources d'énergie différentes ; dans le cadre du QM Chauffages au bois (système de gestion de la qualité pour les centrales de chauffage au bois), le terme « bivalent » fait principalement référence à la centrale de chauffage équipée d'une ou plusieurs chaudières à bois et d'une réserve fossile pour couvrir les pics de consommation et les pannes. Au sens large, ce terme désigne toutefois tout type d'installation de production de chaleur utilisant différentes sources d'énergie (par exemple, bois et énergie solaire thermique, bois et chaleur résiduelle, etc.). |
| Lit de combustion | Dans la technique de combustion, le lit de combustion désigne le combustible sous forme d'un tas régulier (« lit ») sur une grille de combustion ou dans une chambre de combustion. |
| Double tube | Construction spéciale d'un tuyau de chauffage à distance pré-isolé en usine. Les conduites d'alimentation et de retour (conduites de transport) sont installés dans une gaine en plastique commune avec une isolation thermique en mousse PUR. Il existe des versions rigides et flexibles avec des conduites de transport en acier ou en plastique. |
| Économiseur | Un économiseur (en anglais « preheater/saving device ») est un échangeur de chaleur destiné à la récupération de chaleur par valorisation de la chaleur perdue provenant de divers processus thermodynamiques ou industriels. Dans la technologie de combustion et de chaudière, l'économiseur sert à récupérer la chaleur des gaz d'échappement chauds après la chaudière, ce qui réduit la température des gaz d'échappement et augmente l'efficacité de l'ensemble de l'installation. |

| Termes | Signification |
|---|---|
| Surface de référence énergétique | La surface de référence énergétique est un indicateur important pour les bâtiments. Elle correspond à la somme de toutes les surfaces de plancher supérieures et inférieures d'un bâtiment dont l'utilisation nécessite un chauffage ou une climatisation. La surface de référence énergétique est calculée en brut, c'est-à-dire à partir des dimensions extérieures, y compris les murs et les balustrades. Il existe des facteurs de correction spécifiques à chaque pays pour les températures ambiantes différentes, les pièces hautes, etc. À titre approximatif, la surface brute chauffée peut être considérée comme la surface de référence énergétique. |
| Indice d'efficacité énergétique (IEE) | L'indice d'efficacité énergétique sert de base de calcul pour déterminer quels modèles de pompes pourront être utilisés à l'avenir. Il est calculé selon une méthode définie dans le règlement (CE) n° 641/2009. La puissance électrique moyenne de la pompe, déterminée à l'aide d'un profil de charge, est comparée à celle d'une pompe de référence, c'est-à-dire une pompe moyenne ayant la même puissance hydraulique. |
| Planification préliminaire | Phase du projet au cours de laquelle la solution technique du projet est planifiée et définie. En Suisse, cette phase est également appelée « avant-projet », tandis qu'en Allemagne et en Autriche, on parle parfois de planification du système et de l'intégration. |
| Expansion et maintien de la pression | Sous-système du système hydraulique (production et distribution de chaleur) qui absorbe la variation de volume de l'eau chaude entre la température minimale et la température maximale et maintient ainsi une pression statique préréglée à un niveau largement constant (maintien de la pression). |
| Chauffage à distance (réseau thermique) | Le chauffage à distance désigne l'approvisionnement en chaleur par canalisation des clients raccordés à partir d'une ou plusieurs centrales de chauffage. L'installation de canalisations avec tous les équipements supplémentaires nécessaires (à l'exception de la production) est appelée réseau de chauffage à distance. L'eau (rarement la vapeur) est utilisée comme fluide caloporteur pour transporter la chaleur via des pompes et un circuit de tuyauterie fermé vers les stations de transfert de chaleur. Les réseaux de chauffage à distance couvrent une large gamme de puissances, avec des puissances connectées allant de moins de 100 kW à plus de 1 GW.<br>D'autres synonymes équivalents pour réseau de chauffage à distance sont réseau de distribution de chaleur ou réseau thermique. |
| Système d'information géographique (SIG) | Application informatique permettant la saisie, le traitement, l'organisation, l'analyse et la présentation de données spatiales. Elle permet, dans le cadre de la planification de réseaux de chauffage à distance, de déterminer le tracé des conduites en tenant compte des conditions géographiques et des autres systèmes d'approvisionnement éventuellement déjà existants (eau, gaz, électricité, etc.). Le SIG peut également être utilisé pour estimer les besoins locaux en énergie et en puissance. |
| Simultanéité (facteur de simultanéité) | Dans un réseau de consommateurs de chaleur, la simultanéité décrit le fait que, lorsque le nombre de consommateurs est important, tous ne consomment jamais simultanément la puissance thermique maximale garantie par contrat. Le facteur de simultanéité est égal à 1 pour un seul consommateur de chaleur et devient inférieur à 1 pour plusieurs consommateurs de chaleur. Il décrit le rapport entre la puissance maximale effectivement attendue de tous les consommateurs de chaleur et la puissance totale souscrite par les consommateurs de chaleur. |
| Gradient | La gradient est la différence de température minimale entre un fluide chaud émettant de la chaleur et un fluide plus froid absorbant de la chaleur au niveau d'un échangeur de chaleur. Elle sert notamment à déterminer la qualité technique d'un processus de transfert de chaleur. En règle générale, le gradient doit être aussi faible que possible (par exemple, en particulier dans les stations de transfert de chauffage à distance afin d'obtenir une température de retour basse dans le réseau de chauffage). Lors de la conception d'un échangeur de chaleur, il convient toutefois de mettre en balance les avantages et les coûts (liés à des surfaces d'échange de chaleur plus importantes). |
| Planificateur principal | Personne chargée de la planification et responsable de la qualité de l'ensemble de l'installation vis-à-vis du maître d'ouvrage. Pour une conception conforme à la norme QM Chauffages au bois, un planificateur principal doit toujours être désigné dans le plan Q. |
| Installation domestique | L'installation domestique comprend le système de distribution dans le bâtiment pour la distribution de la chaleur ambiante et industrielle ainsi que de l'eau chaude. |
| Raccordement domestique (conduite) | Conduite de raccordement entre le réseau de distribution de chaleur et la station de transfert. |
| Station domestique | La station domestique se compose de la station de transfert et de la centrale domestique. |
| Centrale domestique | La centrale domestique est le lien entre la station de transfert et l'installation domestique. Elle sert à adapter la fourniture de chaleur à l'installation domestique en termes de pression, de température et de débit volumique. Lors de la conception de la centrale domestique, il convient de distinguer entre un raccordement direct ou indirect (avec/sans échangeur de chaleur pour la séparation hydraulique). |
| Eau surchauffée | Dans le domaine de la technique énergétique, le terme « eau surchauffée » désigne le fluide caloporteur eau avec des températures de départ supérieures à 110 °C (cf. eau chaude sanitaire). Par rapport aux installations d'eau chaude sanitaire, les installations d'eau surchauffée sont soumises à d'autres normes, directives et prescriptions, et notamment à des mesures de sécurité plus strictes. |

| Termes | Signification |
|---|---|
| Centrale de chauffage à distance | Installation centrale destinée à fournir de la chaleur à des objets/bâtiments/entreprises de grande taille, à un petit réseau de chaleur ou à un réseau de chauffage à distance. |
| Centrale de cogénération | Installation de production d'énergie permettant de produire simultanément de la chaleur et de l'électricité (voir aussi cogénération). |
| Besoins annuels en chaleur (besoins en chaleur utile) | Les besoins annuels en chaleur d'un consommateur correspondent à ses besoins annuels en chaleur utile au point de transfert de chaleur. Pour un réseau de chauffage à distance, les besoins annuels en chaleur correspondent aux besoins annuels en chaleur au point d'alimentation (interface entre la production de chaleur et le réseau de distribution de chaleur) et comprennent également les pertes de chaleur du réseau de chauffage à distance. |
| Production annuelle de chaleur | La production annuelle de chaleur est la somme de la production de chaleur de toutes les installations de production de chaleur (quelle que soit la source d'énergie) au cours d'une année. |
| Coefficient de performance annuel (COPA) | Le coefficient de performance annuel décrit le rapport entre la production annuelle de chaleur et l'énergie électrique ou thermique fournie à une pompe à chaleur pendant la même période. Il décrit ainsi l'efficacité d'une pompe à chaleur sur une période de fonctionnement prolongée, par opposition à la valeur instantanée du coefficient de performance (voir également Coefficient de performance). |
| Heures de fonctionnement annuelles | Nombre effectif d'heures par an pendant lesquelles une installation est en service. Contrairement à une heure de fonctionnement à pleine puissance, le comptage des heures de fonctionnement s'effectue indépendamment de l'état de charge, c'est-à-dire qu'une heure de fonctionnement à 50 % de la puissance est considérée comme une heure de fonctionnement (cf. heures de fonctionnement à pleine puissance). |
| Température d'entrée de la chaudière | Température du fluide caloporteur mesurée dans la conduite directement à l'entrée de la chaudière (après le maintien de la température de retour !). |
| Température de sortie de la chaudière | Température du fluide caloporteur mesurée dans la conduite directement à la sortie de la chaudière. La température de sortie de la chaudière est une grandeur de régulation fondamentale pour la chaudière. |
| Rendement de la chaudière | Énergie utile produite par une chaudière côté eau divisée par l'énergie fournie par le combustible sous forme de pouvoir calorifique. La détermination s'effectue soit à l'état stationnaire sans effets d'accumulation (par exemple dans le cas de foyers automatiques), soit sur l'ensemble du processus de combustion (par exemple dans le cas de foyers à alimentation manuelle). |
| Vanne combinée | Les vannes combinées sont des vannes spéciales qui sont principalement utilisées dans les stations de transfert de chauffage à distance afin de réaliser à la fois une limitation du débit volumique et une régulation de la pression différentielle avec un seul raccord. La limitation du débit volumique réglable permet de régler le débit volumique maximal possible et donc la puissance maximale (= puissance connectée souscrite) de la station de transfert. De plus, la pression différentielle et donc le débit côté primaire sont régulés en fonction de la température de départ secondaire mesurée afin d'atteindre la température de départ de consigne requise côté secondaire. |
| Courbe de charge | La courbe de charge est la représentation des besoins en puissance thermique en fonction de la température extérieure moyenne journalière. Pour la température extérieure, il faut toujours utiliser la moyenne sur 24 heures ; en revanche, la puissance thermique requise peut être une moyenne journalière (par exemple pour les bâtiments résidentiels) ou une valeur maximale (par exemple pour les immeubles de bureaux). La courbe de charge de l'ensemble de l'installation résulte de l'empilement de plusieurs courbes de charge (voir chapitre 11.3.2). |
| Coefficient de performance (COP) | Le coefficient de performance (COP) est le rapport entre la puissance calorifique utile produite et la puissance électrique ou thermique fournie à une pompe à chaleur. Il décrit une valeur instantanée ou une valeur déterminée sur une période d'observation de courte durée. Le coefficient de performance maximal thermodynamiquement (théoriquement) atteignable est appelé COP de Carnot. Il peut être converti en COP réel d'une pompe à chaleur à l'aide d'un degré de qualité spécifique au produit. Le coefficient de performance annuel (voir Coefficient de performance annuel) sert à l'évaluation sur une période d'observation plus longue. |
| Température de fonctionnement maximale admissible | Température de fonctionnement maximale admissible sur une courte période pour une installation (production de chaleur, réseaux de chaleur, etc.). |
| Température de fonctionnement maximale en continu | Température de fonctionnement maximale admissible sans limitation dans le temps. |

| Termes | Signification |
|---|---|
| Jalon | QM Chauffages au bois fixe 5 étapes clés pour l'assurance qualité à la fin des phases les plus importantes du projet (voir chapitre 2.3.3) :<br>1er Mise en place de la gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois et de la planification de la qualité à la fin de la phase 1 du projet<br>2e Contrôle qualité et gestion qualité au niveau des études préliminaires à la fin de la phase 2 du projet<br>3e Contrôle qualité et gestion qualité au niveau du projet d'appel d'offres à la fin de la phase 3 du projet<br>4e Contrôle qualité et gestion qualité au niveau de la réception à la fin de la phase 5 du projet<br>5e Contrôle qualité et clôture de la gestion de la qualité des centrales de chauffage au bois après une année d'exploitation à la fin de la phase 6 du projet |
| Production de chaleur monovalente | Production de chaleur avec un seul caloporteur, par exemple une centrale de chauffage fonctionnant exclusivement avec des chaudières à bois (cf. production de chaleur bivalente). |
| Pression nominale PN (Pressure Nominal) | La pression nominale indique une valeur de référence pour un système de tuyauterie en termes de pression de conception. Elle est indiquée selon les normes DIN, EN et ISO par la désignation PN (Pressure Nominal) suivie d'un chiffre qui indique la pression de conception en bar à température ambiante (20 °C). La définition et la sélection sont effectuées conformément à la norme EN 1333 [150] . |
| Diamètre nominal DN | Le diamètre nominal indique un diamètre de référence pour un système de tuyauterie, qui permet de définir la taille et la compatibilité des composants. Le diamètre nominal fait partie de la désignation du composant selon la norme EN ISO 6708 [151] et n'est pas identique au diamètre intérieur ou extérieur d'un tuyau ou d'un composant. |
| Puissance thermique nominale | Puissance maximale continue d'une installation (par exemple, une chaudière à bois) pour laquelle elle est conçue sans limitation de durée, selon les indications du fabricant et les combustibles qui y sont définis. |
| Pression du réseau | La pression du réseau désigne la pression dans la conduite du chauffage à distance. |
| Point faible du réseau (point faible) | Position dans un réseau de chaleur où la différence de pression entre l'aller et le retour est la plus faible. Ce point se trouve généralement dans une station de transfert éloignée de la ou des centrales de chauffage, mais peut se déplacer en fonction de l'état de fonctionnement actuel du réseau de chaleur (situation de prélèvement et d'alimentation). Le point faible du réseau sert de valeur de référence pour la conception des pompes du réseau (unité de pompage principale). L'installation de capteurs de pression différentielle au point faible du réseau permet également de réguler les pompes du réseau en fonction de la pression différentielle au point faible. |
| Température du réseau | La température du réseau désigne la valeur commune de la température de départ et de retour en degrés Celsius (par exemple 80/50) et doit être comprise comme une valeur typique pour un réseau de chaleur (éventuellement avec une distinction entre le fonctionnement en été et en hiver). |
| Séparation du réseau | La séparation du réseau désigne la séparation de deux sections du réseau ou du réseau des unités de production. Cela peut être réalisé, par exemple, à l'aide d'un échangeur de chaleur (séparation technique, fluides caloporteurs séparés) ou d'un séparateur hydraulique (séparation hydraulique, fluide caloporteur commun). |
| Pertes de réseau<br>(Pertes de distribution de chaleur) | Les pertes de distribution de chaleur sont un paramètre important pour les réseaux de chaleur (également appelées pertes du réseau). Elles sont définies comme la différence entre la quantité de chaleur fournie à un réseau de chaleur (par la production) et la quantité de chaleur consommée par tous les consommateurs de chaleur (somme de la consommation de chaleur des différents consommateurs). Les pertes de distribution de chaleur peuvent être représentées sous forme de valeur absolue (= différence entre les quantités de chaleur) ou de valeur relative (pertes de réseau en pourcentage). Dans le cas des pertes de réseau relatives, la différence entre l'alimentation et la consommation est divisée par la quantité de chaleur alimentée. Les pertes du réseau sont déterminées par la puissance de perte du réseau, qui dépend de la différence de température entre le fluide de chauffage à distance et l'environnement (sol), de la qualité de l'isolation des conduites de chauffage à distance et du diamètre des conduites. |
| Rendement,<br>Rendement annuel | Le rendement est le rapport entre l'énergie utile produite sur une période d'observation prolongée et l'énergie fournie pendant la même période d'observation. Il correspond à la consommation utile cumulée pendant la période d'observation (par exemple, la chaleur comptabilisée par le compteur de chaleur) divisée par la chaleur fournie cumulée pendant la période d'observation (par exemple, le contenu énergétique du combustible brûlé). Si l'observation porte sur une période d'un an, on parle de rendement annuel (voir également le chapitre 20.12).<br>Si le rapport entre l'énergie utile et l'énergie fournie est déterminé sur une courte période d'observation ou en tant que valeur instantanée, on parle alors d'efficacité (voir également efficacité). |
| Pile de bois | En sylviculture, on désigne par « pile de bois » des grumes empilées de même longueur, stockées dans des lieux de collecte ou des entrepôts à bois. |

| Termes | Signification |
|---|---|
| Côté primaire | Dans une station de transfert de chaleur, le côté primaire désigne le côté du réseau de chaleur, c'est-à-dire la partie de l'installation traversée par le fluide caloporteur. Les termes de température primaire de départ et de retour, qui désignent les températures régnant du côté primaire (côté réseau) de l'échangeur de chaleur, en sont dérivés. Il en va de même pour le terme de pression primaire (voir également côté secondaire). |
| Gestion de la qualité liée au projet (PQM) | Garantit que la qualité requise est définie et contrôlée dans le cadre d'un projet limité dans le temps auquel participent plusieurs entreprises. La PQM ne doit pas être confondue avec la gestion de la qualité liée à l'entreprise (certification selon ISO 9000) et le contrôle des échantillons de marchandises (homologation). La PQM peut toutefois être appliquée dans le cadre de systèmes de gestion de la qualité certifiés au niveau de l'entreprise par les entreprises participant au projet. (QM-Chauffages au bois est un système PQM ; voir chapitre2.1 ) |
| Phases du projet | QM Chauffages au bois divise le déroulement du projet en 6 phases :<br>1er Études préliminaires<br>2e Planification préliminaire<br>3e Planification de l'appel d'offres<br>4e Appel d'offres et attribution<br>5e Exécution et réception<br>6e Optimisation de l'exploitation<br>Les phases du projet de QM Chauffages au bois décrivent un déroulement typique du projet, mais les désignations et l'étendue détaillée des travaux des différentes phases du projet peuvent varier selon les pays/régions. À cet effet, il convient de tenir compte des normes et directives en vigueur dans chaque pays. |
| Responsable qualité | Il veille à ce que le système de gestion de la qualité « QM Chauffages au bois » soit mis en place et respecté. Ses activités sont les suivantes : planification de la qualité, contrôle de la qualité et vérification de la qualité. |
| QM-Chauffages au bois | Système de gestion de la qualité spécifique au projet pour les centrales de chauffage au bois. Il se concentre sur la conception, la planification et la réalisation professionnelles de l'installation de production de chaleur et du réseau de chaleur afin de garantir une sécurité de fonctionnement élevée, une régulation précise, de bonnes propriétés en matière d'hygiène de l'air et une logistique de combustible économique. L'objectif est d'assurer un fonctionnement économe en énergie, respectueux de l'environnement et économique de l'ensemble de l'installation. |
| Plan QM | Le plan QM est le document central de QM Chauffages au bois dans lequel les exigences de qualité (y compris l'instrumentation, la méthode de mesure et la tolérance) et les responsabilités sont définies avant la réalisation de l'installation, puis régulièrement vérifiées et mises à jour au cours du projet. Le plan QM se compose de deux documents :<br>• Document principal, créé lors de la mise en place de QM Chauffages au bois dans l'étape 1<br>• Document supplémentaire, avec un tableau EXCEL, créé à chaque étape franchie par QM Chauffages au bois. Le document supplémentaire sert au contrôle et à la gestion de la qualité pendant le déroulement du projet (voir chapitre 2.3.4). |
| Qualité | Rapport entre la qualité réelle d'un objet matériel ou immatériel (ici : la centrale de chauffage au bois et le réseau de chaleur) et les exigences de qualité (généralement constituées d'une somme d'exigences individuelles). Une bonne qualité signifie donc ici que l'installation technique réalisée répond à toutes les exigences de qualité convenues dans le plan qualité, dans les limites des tolérances convenues. |
| Exigences de qualité (exigences QM) | Exigences individuelles imposées à la qualité d'une installation. Dans QM Chauffages au bois, les exigences de qualité d'une installation de chauffage au bois sont définies dans le plan qualité. Les exigences de qualité sont formulées en détail dans le guide qualité. |
| Contrôle qualité (contrôle QM) | Définition de mesures dans le déroulement du projet qui garantissent que les écarts de qualité sont détectés et corrigés à temps. |
| Gestion de la qualité (QM) | Comprend la méthodologie et toutes les activités qui définissent les exigences de qualité et les responsabilités et les mettent en œuvre par le biais de la planification, du contrôle et du contrôle de la qualité. |
| Planification de la qualité (Planification QM) | Définition claire des exigences de qualité, y compris les responsabilités, les instruments, les méthodes de mesure et les tolérances dans un plan QM. S'assurer que les exigences individuelles énoncées dans le plan QM sont conformes aux règles reconnues de l'art de la construction et à l'état actuel de la technique. |
| Contrôle qualité (Contrôle QM) | Contrôle continu pendant le déroulement du projet et en particulier à la fin (contrôle final) afin de vérifier si les exigences de qualité convenues dans le plan qualité se situent dans les limites de tolérance convenues. |

| Termes | Signification |
|---|---|
| Quench | Le quench est un élément optionnel pouvant être intégré à une installation de condensation des gaz de combustion. Dans le quench, un flux de gaz d'échappement chaud est refroidi jusqu'au point de saturation par injection d'eau. Cela permet d'obtenir une meilleure récupération de chaleur (transfert de chaleur) à partir des gaz d'échappement. La saturation des gaz d'échappement garantit également que le condenseur en aval fonctionne toujours à l'état humide afin d'éviter l'encrassement et la corrosion. L'injection d'eau permet en outre d'« éliminer » la poussière contenue dans les gaz d'échappement. Les quenchs font donc également partie des épurateurs de gaz de combustion, où l'injection d'eau permet de lier la poussière contenue dans le flux de gaz d'échappement et de la séparer dans des séparateurs de gouttes en aval (par exemple des séparateurs centrifuges). |
| Redondance | Mise à disposition d'une unité fonctionnelle supplémentaire, non nécessaire en fonctionnement normal, comme réserve en cas de panne afin d'augmenter la sécurité de fonctionnement (par exemple, l'installation d'une deuxième pompe identique). |
| Intervalle de nettoyage | Dans le cas d'une installation de combustion et d'une chaudière, l'intervalle de nettoyage désigne la période de fonctionnement entre deux arrêts planifiés à des fins de nettoyage (manuel). |
| Clients clés | Clients consommant beaucoup de chaleur, qui contribuent de manière significative à la consommation totale d'un réseau de chaleur et qui sont donc d'une grande importance pour le développement du projet (accent mis sur les clients clés potentiels – voir chapitre 3.2.4), la planification globale et le dimensionnement du réseau de chaleur et des installations de production. |
| Mètre cube vrac (m3v) | Volume en vrac des plaquettes (ou copeaux) de bois en mètres cubes. |
| Côté secondaire | Dans une station de transfert, le côté secondaire désigne le côté bâtiment, c'est-à-dire la partie de l'installation traversée par le fluide caloporteur de l'installation domestique. Les termes de température secondaire de départ et de retour désignent les températures qui prévalent du côté secondaire (côté bâtiment) de l'échangeur de chaleur. De manière analogue, le terme de pression secondaire (voir également côté primaire). |
| Relevé de situation | Le relevé de situation consiste en une analyse de la situation actuelle avec recensement des besoins en énergie et en puissance pour le chauffage (chauffage des locaux, eau chaude et chaleur industrielle), de la situation architecturale pour la pose des conduites et de la zone potentielle d'approvisionnement en chaleur (voir chapitre **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). |
| Charge de pointe | Besoins maximaux en puissance thermique, qui ne surviennent généralement que pendant une courte période (par exemple, lorsque les températures extérieures sont très basses ou lors des pics de puissance d'un réseau de chaleur le matin). La charge de pointe d'une installation est généralement plusieurs fois supérieure à la puissance moyenne quotidienne ou annuelle. La charge de pointe qui se produit à une influence significative sur la configuration de l'installation et le dimensionnement de tous les composants de l'installation. L'intégration de réservoirs d'équilibrage de charge permet de réduire la charge de pointe à fournir effectivement par les installations de production. Des chaudières de pointe supplémentaires (souvent fossiles) sont également utilisées pour couvrir la charge de pointe. Celles-ci doivent avoir une large plage de régulation et pouvoir être mises en service et arrêtées rapidement. À titre de redondance supplémentaire, la ou les chaudières de pointe sont souvent dimensionnées en grande taille afin de compenser la défaillance d'une ou plusieurs chaudières de base (réserve de défaillance). |
| Durée de vie | Dans le cas des installations, des machines ou des outils, la durée de vie désigne la période pendant laquelle ceux-ci peuvent fonctionner jusqu'à ce que la prochaine maintenance, le prochain nettoyage ou autre intervention similaire doive être effectué. La durée de vie est la période pendant laquelle l'installation (machine, outil) peut fonctionner sans interruption. |
| Stoker (vis d'alimentation) | Convoyeur permettant d'acheminer le combustible directement dans la chambre de combustion ou sur la grille de combustion. Il s'agit donc du dernier maillon dans le transport du combustible depuis le stockage jusqu'à la combustion. Le stoker peut être conçu comme un convoyeur à vis (vis sans fin), un dispositif d'insertion hydraulique ou selon d'autres types de construction (par exemple, alimentation par projection avec spreader-stoker). Le stoker doit assurer une alimentation régulière en combustible et répondre à des exigences particulières en matière d'étanchéité à l'air, de protection contre le retour de flamme et de résistance à la température. |
| Granulométrie | Indique les dimensions et la géométrie des combustibles solides et constitue un élément essentiel de la caractérisation des combustibles issus de la biomasse. La granulométrie est indiquée conformément aux normes relatives aux combustibles, telles que la norme EN-ISO 17225[23] . |
| Tarif (barème tarifaire) | La fiche tarifaire fait partie intégrante du contrat de fourniture de chaleur et régit les prix, les tarifs et les autres conditions relatives à la fourniture de chaleur (voir également contrat de fourniture de chaleur). |

| Termes | Signification |
|---|---|
| Prescriptions techniques de raccordement PTR | Les prescriptions techniques de raccordement PTR (également appelées conditions techniques de raccordement CTR) régissent dans l'idéal toutes les conditions techniques pertinentes pour le raccordement à un réseau de chauffage à distance, telles que la pression, la température, les matériaux, les équipements de mesure, la facturation et autres. Elles s'appliquent à la planification, au raccordement et à l'exploitation du réseau de chauffage à distance. Les PTR font partie intégrante du contrat de fourniture de chaleur. (voir également le chapitre 8.9.2). |
| Écart de température | Différence entre la température de départ et de retour ou entre l'entrée et la sortie d'un appareil. Dans un réseau de chauffage à distance, on s'intéresse généralement à l'écart de température du côté primaire, c'est-à-dire dans le réseau de chauffage à distance, entre l'entrée et la sortie des générateurs de chaleur et entre le haut et le bas des accumulateurs. |
| Tracé<br>Longueur du tracé | Le tracé est la zone du terrain nécessaire au passage de la conduite de chauffage à distance. La détermination du tracé fait partie de la planification du réseau de chauffage à distance et a une influence significative sur le raccordement de la zone d'approvisionnement et l'extension future du réseau, ainsi que sur les coûts d'investissement d'un réseau de chauffage.<br>La longueur du tracé correspond à la longueur totale en mètres du tracé des conduites principales, des conduites de dérivation et des conduites de raccordement domestiques. Avec une conduite pour l'aller et une pour le retour, la longueur de la conduite est le double de la longueur du tracé. |
| Sous-station (station de transfert) | La sous-station est le lien entre la conduite de raccordement domestique et la centrale domestique. Elle sert au transfert de la chaleur conformément au contrat et à la mesure de la consommation de chaleur. |
| Chaleur ambiante, chaleur environnementale | La chaleur ambiante ou chaleur environnementale est une forme d'énergie renouvelable, naturelle et disponible partout, qui se trouve généralement à un niveau de température relativement bas. Les sources de chaleur ambiante sont l'air, la couche supérieure du sol ainsi que les eaux souterraines, lacustres et fluviales. Les pompes à chaleur permettent d'élever la chaleur ambiante à un niveau de température plus élevé et de la rendre utilisable. Pour cela, il est nécessaire d'apporter de l'énergie de haute qualité sous forme d'électricité ou de chaleur à haute température provenant d'une autre source.<br>La chaleur ambiante provenant de la géothermie profonde ou d'origine volcanique peut également fournir une chaleur directement utilisable à une température plus élevée. |
| Heures de fonctionnement à pleine charge et nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge (heures à pleine charge) | Le nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge correspond à la consommation énergétique annuelle divisée par la puissance thermique nominale. Il s'agit d'un paramètre important pour le dimensionnement de l'installation pour un consommateur individuel (nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge du consommateur de chaleur), une chaudière ou la production totale. Une heure à pleine charge correspond par exemple à une heure de fonctionnement à la charge nominale ou à deux heures de fonctionnement à 50 % de la charge, et la règle suivante s'applique : nombre d'heures à pleine charge ≤ nombre d'heures de fonctionnement annuelles (voir heures de fonctionnement annuelles). |
| Étude préliminaire (planification préliminaire, étude de faisabilité) | Phase précoce du projet au cours de laquelle est déterminée la variante du projet qui répond le mieux aux exigences fixées. La décision de poursuivre le projet (décision d'investissement) est prise sur la base de l'étude préliminaire. Selon le pays/la région, l'étude préliminaire est également appelée planification préliminaire, étude de faisabilité ou planification du projet et préparation (voir également le chapitre 3.2). |
| Cogénération (couplage chaleur-force) | Installation de production d'énergie permettant de produire simultanément de la chaleur et de l'électricité. Pour cela, on utilise des machines thermiques telles qu'une installation ORC ou d'un moteur à combustion interne qui produisent non seulement de l'électricité, mais aussi de la chaleur utilisable. Les installations compactes équipées de moteurs ou de petites turbines à gaz sont également appelées unités de cogénération (voir chapitre 13.6.3). |
| Densité de consommation de chaleur (densité de raccordement) | La densité de consommation de chaleur est la consommation annuelle de chaleur de tous les bâtiments d'une zone d'approvisionnement par rapport à la superficie de la zone d'approvisionnement (voir chapitre 12.2.2). |
| Consommateur de chaleur<br>Preneur de chaleur | Bâtiments/objets raccordés à un réseau de chauffage à distance (et leurs propriétaires) qui achètent de la chaleur au réseau de chauffage ou à la centrale de chauffage (et donc à une entreprise de fourniture de chaleur) conformément aux accords stipulés dans le contrat de fourniture de chaleur. |
| Coûts de production de chaleur | Les coûts de production de chaleur correspondent au rapport entre les coûts annuels de production de chaleur et la chaleur utile produite chaque année. Ils représentent les coûts de production spécifiques de la chaleur en CHF/MWh ou €/MWh (voir chapitre **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Les coûts annuels sont généralement calculés à l'aide de la méthode des annuités selon la norme VDI 2067[100] et comprennent les coûts d'investissement (annuité de l'investissement), les coûts d'exploitation (coûts d'entretien/de maintenance et de personnel), les coûts énergétiques (combustibles et énergie auxiliaire) et les autres coûts (par exemple, la planification). |
| Entreprises de fourniture de chaleur (fournisseurs de chaleur) | Entreprise (société d'exploitation) qui exploite l'installation d'approvisionnement en chaleur (centrale de chauffage, réseau de chaleur) et qui est responsable de la fourniture d'un approvisionnement en chaleur garanti aux consommateurs de chaleur, conformément au contrat de fourniture de chaleur. |
| Contrat de fourniture de chaleur | Le contrat de fourniture de chaleur définit l'interface contractuelle entre l'entreprise de fourniture de chaleur (fournisseur) et le consommateur de chaleur (client). En règle générale, le contrat de fourniture de chaleur comprend également les |

| | |
|---|---|
| | éléments contractuels suivants : conditions générales de vente (CGV), prescriptions techniques de raccordement (PTR) et grille tarifaire. |
| Fluide caloporteur | Fluide utilisé pour le transport de la chaleur, tel que l'eau, la vapeur ou l'huile thermique. |
| Échangeur de chaleur | Un échangeur de chaleur (anciennement : échangeur thermique) est un appareil dans lequel l'énergie thermique est transférée d'un flux de matière chaud à un autre flux de matière plus froid via des surfaces de transfert de chaleur (par exemple, des plaques ou des faisceaux de tubes). |
| Eau chaude sanitaire | Dans la technique du bâtiment, l'eau chaude sanitaire (ECS) désigne l'eau potable chauffée (également appelée eau chaude) qui est fournie à environ 60 °C. Le chauffage et la fourniture d'eau chaude sanitaire sont assurés par des chauffe-eau. Il peut s'agir d'un réservoir (chauffe-eau à accumulation, chaudière) ou d'un chauffe-eau instantané. |
| Conduites publiques | Ce terme désigne les canalisations d'égouts, d'eau, d'eaux usées et d'électricité d'une commune, d'une ville ou d'une entreprise. |
| Efficacité | L'efficacité d'une installation technique décrit le rapport entre l'énergie utile et l'énergie fournie. Dans des conditions stationnaires sans distorsion due à des effets de stockage, le rendement peut également être défini comme le rapport entre la puissance utile et la puissance fournie. Dans le présent manuel, le terme d'efficacité est utilisé pour désigner une valeur instantanée déterminée à partir des puissances ou une valeur déterminée sur une courte période d'observation.<br>Pour évaluer le fonctionnement de l'installation sur une période d'observation plus longue, le rendement décrit le rapport entre l'énergie utile totale sur la période d'observation et l'énergie fournie totale sur la période d'observation (voir rendement). |
| Valeur cible | Valeur qui a fait ses preuves dans des projets comparables et couronnés de succès. Si une valeur cible est indiquée pour une exigence de qualité, cela signifie que cette valeur doit être visée. Il peut toutefois y avoir de bonnes raisons de s'écarter de cette valeur cible ; les écarts doivent toutefois être justifiés. (En revanche, une valeur limite ne doit pas être dépassée ou sous-dépassée.) |

# 22 Bibliographie


[1] Eurostat, « balances 2018 ». Consulté le 22 janvier 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances

[2] A. Camia, N. E. Cazzaniga, R. Jonsson et D. Palermo, « Sankey diagrams of woody biomass flows in the EU-28. », Centre de connaissances pour la bioéconomie de la Commission européenne, Bruxelles, brochure, 2019. Consulté le 28 janvier 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : http://publications.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_KJ0119205ENN

[3] Centre de connaissances pour la bioéconomie de la Commission européenne, « Sankey diagrams of woody biomass flows in the EU-28 - Years 2009-2015 ». Commission européenne, 2019. Consulté le 28 janvier 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://data.europa.eu/doi/10.2760/227292

[4] N. Scarlat, J.-F. Dallemand, N. Taylor et M. Banja, « Note sur la biomasse énergétique dans l'Union européenne », Office des publications de l'Union européenne, 2019. Consulté le 22 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/55047

[5] IEA Data and statistics, « World Energy Balance 2018 », AIE. Consulté le 22 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables

[6] Nations Unies, Département des affaires économiques et sociales, « World Population Prospects: The 2017 Revision, Data Booklet », Département des affaires économiques et sociales, Division de la population, ST/ESA/SER.A/401, 2017. Consulté le 22 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_DataBooklet.pdf

[7] R. Palen, « First population estimates - EU population up to nearly 513 million on 1 January 2018 - Increase driven by migration », Eurostat, Bruxelles, communiqué de presse 115/2018, juillet 2018. Consulté le 22 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances

[8] U. Kaufmann, « Statistique suisse des énergies renouvelables », Office fédéral de l'énergie, Berne, édition 2018, septembre 2019. Consulté le 28 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/teilstatistiken.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZ-mUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvOTgyOQ==.html

[9] Agence internationale pour les énergies renouvelables IRENA, « Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2019 », Agence internationale pour les énergies renouvelables IRENA, Abu Dhabi, 2019. Consulté le 22 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur : /publications/2019/Jun/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2019

[10] Observ'ER, « The state of Renewable Energies in Europe - 19th EurObserv'ER Report ». Consulté le 22 janvier 2021. [En ligne]. Disponible sur : http://www.energies-renouvelables.org/

[11] A. P. C. Faaji, « Securing sustainable resource availability of biomass for energy applications in Europe; review of recent literature », Université de Groningue, Groningue, article spécialisé, 2018. Consulté le 22 janvier 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://energy.nl/wp-content/uploads/2019/06/Bioenergy-Europe-EU-Biomass-Resources-Andr%C3%A9-Faaij-Final.pdf

[12] M. Banja, R. Sikkema, M. Jégard, V. Motola et J.-F. Dallemand, « Biomass for energy in the EU – The support framework », *Energy Policy*, vol. 131, p. 215-228, août 2019, doi : 10.1016/j.enpol.2019.04.038.

[13] Direction générale de l'énergie (Commission européenne), Trinomics, T. Badouard et M. Altman, *Energy subsidies: energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments: final report*. Luxembourg : Office des publications de l'Union européenne, 2020. Consulté le 29 septembre 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse: https://data.europa.eu/doi/10.2833/546611

[14] Cour des comptes européenne, éd., *Les fonds de la politique de cohésion ont-ils permis d'obtenir de bons résultats en matière de promotion de la production d'énergies renouvelables ? conformément à l'article 287, paragraphe 4, deuxième alinéa*, du

[15] R. Bühler, H. R. Gabathuler et A. Jenni, *Guide QMstandard*, 3e édition augmentée, vol. 1, 6 vol. dans la série QM Chauffages au bois, vol. 1. Straubing : C.A.R.M.E.N. e.V, 2011. [En ligne]. Disponible sur : https://www.qmChauffages au bois.ch/publikationen.html

[16] S. Thalmann, *Rénovation des installations bois-énergie*. (Mars 2020). ger. Energie-bois Suisse et ARGE QM Chauffages au bois, Zurich. [Excel]. Disponible sur : https://www.qmChauffages au bois.ch/de/downloads.html

[17] ARGE QM Chauffages au bois, « QM Chauffages au bois », QM Chauffages au bois. Consulté le 9 décembre 2019. [En ligne]. Disponible sur : https://www.qmChauffages au bois.ch/de/home.html

[18] B. Meier, C. Moser, C. Vogler et R. Dettli, « Aspects socio-économiques des réseaux thermiques », econcept AG, Zurich, rapport final, avril 2019. Consulté le 18 mars 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.econcept.ch/de/projekte/soziookonomische-aspekte-thermischer-netze/

[19] T. Nussbaumer, S. Thalmann, A. Jenni et J. Ködel, *Manuel de planification du chauffage à distance*, version 1.2. Zurich : Verenum Dr Thomas Nussbaumer, 2018. [En ligne]. Disponible sur : http://www.verenum.ch/Planungshandbuch_QMFW.html

[20] L. Küng, P. Kräuchi et G. Kayser, « Risques liés aux réseaux thermiques », BG Ingénieurs Conseils SA, Berne, rapport final, avril 2018. [En ligne]. Disponible sur : https://www.energieschweiz.ch/de-ch/home.aspx?p=22949,22963,22984,22985

[21] H. Thorwarth, H. Gerlach, L. Rieger, M. Schroth, R. Krichhof et J. Tejada, « Influences naturelles sur la qualité des combustibles bois et leurs effets sur l'exploitation des centrales de cogénération au bois », *VGB PowerTech J. 112018*, 2018, consulté le 21 avril 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.vgb.org/pt_11_18.html

[22] « DIN EN ISO 16993:2016-11, Combustibles solides biogènes - Conversion des résultats d'analyse d'une base de référence en résultats avec une autre base de référence (ISO_16993:2016) ; version allemande EN_ISO_16993:2016 », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/2555895.
[23] « DIN EN ISO 17225-1:2014-09, Combustibles solides biogènes - Spécifications et classes de combustibles - Partie 1 : Exigences générales (ISO_17225-1:2014) ; version allemande EN_ISO_17225-1:2014 », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/2073606.
[24] « DIN EN ISO 18125:2017-08, Combustibles solides d'origine biologique - Détermination du pouvoir calorifique (ISO_18125:2017) ; version allemande EN_ISO_18125:2017 », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/2603463.
[25] J. Hahn, M. Schardt, F. Schulmeyer et F. Mergler, « Energieinhalt von Holz » (Contenu énergétique du bois), Institut bavarois des forêts et de la sylviculture (LWF), Freising, fiche technique 12, 2014. Consulté le 21 avril 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.lwf.bayern.de/service/publikationen/lwf_merkblatt/022952/index.php
[26] F. Kollmann, « Holz und Feuchtigkeit Teil 2: Freies Wasser, Schwinden und Quellen, Eigenschaftsänderungen, Holzfeuchtigkeit und Schädlinge, Heizwert » (Bois et humidité, partie 2 : eau libre, retrait et gonflement, *Holz-Zentralblatt*
[27] M. Kaltschmitt, H. Hartmann et H. Hofbauer, éd., *Energie aus Biomasse : Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 3e édition actualisée et augmentée. Berlin Heidelberg : Springer Vieweg, 2016.
[28] « DIN EN ISO 17827-1:2016-10, Combustibles solides biogènes - Détermination de la distribution granulométrique des combustibles non comprimés - Partie 1 : Méthode du tamis vibrant horizontal avec des tamis d'une taille de maille de 3,15 mm et plus (ISO 17827-1:2016) ; Version allemande EN_ISO_17827-1:2016 », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/2360044.
[29] D. Kuptz, E. Dietz, K. Schreiber, C. Schön, R. Mack et H. Hartmann, « *Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb - Brennstoffqualität und Verbrennungsverhalten* » (Plaquettes de bois issus de cultures à courte rotation - Qualité du combustible et comportement à la combustion)
[30] M. Kern, T. Raussen, K. Funda, A. Lootsma et H. Hofmann, *Coûts et avantages d'une valorisation optimisée des biodéchets en termes d'efficacité énergétique, de protection du climat et des ressources*. dans Texte, n° 43/2010. Dessau-Rosslau : Agence fédérale de l'environnement, 2010. Consulté le 21 avril 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aufwand-nutzen-einer-optimierten
[31] L. Eltrop et Université de Stuttgart, éd., *Leitfaden feste Biobrennstoffe : Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im mittleren und großen Leistungsbereich*, 4e édition entièrement révisée. Gülzow-Prüzen : FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V, 2014.
[32] H. Thorwarth, M. Wöhler et S. Rieder, «Influence of Road Salt on Chemical Properties of Road Side Biomass», présenté lors de la 25e Conférence et exposition européenne sur la biomasse, Stockholm, 12 juin 2017.
[33] H. Thorwarth et M. Scheuber, « Die Qualität bestimmt die Grenzen der Kaskadennutzung von Altholz », *MÜLL AB-FALL*, n° 3, p. 6, mars 2020, doi : 10.37307/j.1863-9763.2020.03.06.
[34] P. O. de l'Union européenne, *décision de la Commission du 18 décembre 2014 modifiant la décision 2000/532/CE établissant une liste de déchets en application de la directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE*. Office des publications de l'Union européenne, 2014. Consulté le 21 avril 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse: http://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/bb120f99-8ff5-11e4-b8a5-01aa75ed71a1/language-de/format-PDFA1A
[35] Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC), *Ordonnance du DETEC sur les listes relatives aux mouvements de déchets*. 2005. Consulté le 21 avril 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/714/de
[36] Confédération suisse, *Ordonnance sur la protection de l'air (OPair)*, vol. 814.318.142.1. 1985, p. 96. Consulté le 12 avril 2024. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19850321/index.html
[37] N. Hofmann, T. Mendel, D. Kuptz, F. Schulmeyer, H. Borchert et H. Hartmann, *Stockage des plaquettes de bois - Pertes de matière sèche, modifications de la qualité du combustible et coûts*. Straubing : Centre technologique et de promotion du centre de compétence pour les matières premières renouvelables (TFZ), 2017. Consulté le 21 avril 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.tfz.bayern.de/service/presse/186025/index.php
[38] W. Becke, C. Fink, M. Hamilton-Jones, R. Pertschy et C. Rohringer, « Résultats de surveillance des grandes installations solaires thermiques pour les applications de séchage », dans *les documents de la conférence Symposium en ligne sur l'énergie solaire thermique et les systèmes de chauffage innovants*, Connexio GmbH, éd., Connexio GmbH, 2021, p. 196-207.
[39] W. Emhofer, « Emissions from wood pellets during storage », thèse, 2015. Consulté le 21 avril 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/3701
[40] « Phyllis2 - Base de données sur la composition physico-chimique de la biomasse lignocellulosique (traitée), des microalgues et macroalgues, de diverses matières premières pour la production de biogaz et de biochar ». Consulté le 21 avril 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://phyllis.nl/
[41] « FRED - Base de données sur les sources d'énergie renouvelables solides ». Consulté le 21 avril 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.fred.bayern.de/
[42] H. Thorwarth, « Validation et automatisation de l'analyse des combustibles dans une centrale thermique », présenté lors du 16e congrès spécialisé sur l'énergie du bois, Augsbourg, 2016.
[43] L. Lasselsberger, *Petits systèmes de combustion pour le bois – Technique de combustion/état de la technique/réglementations/développement*. Wieselburg : Institut fédéral pour la technique agricole, 2000.
[44] D. Kuptz, F. Schulmeyer, K. Hüttl, E. Dietz, H. Borchert et H. Hartmann, *Procédés optimaux de mise à disposition des plaquettes de bois*. Straubing : Centre technologique et de promotion du centre de compétence pour les matières

premières renouvelables (TFZ), 2015. Consulté le 21 avril 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.tfz.bayern.de/service/presse/186025/index.php

[45] « DIN EN ISO 18134-1:2015-12, Combustibles solides biogènes - Détermination de la teneur en eau - Séchage au four - Partie 1 : Teneur totale en eau - Méthode de référence (ISO 18134-1:2015) ; Version allemande EN_ISO_18134-1:2015 », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/2311530.

[46] « DIN EN ISO 18134-2:2017-05, Combustibles solides d'origine biologique - Détermination de la teneur en eau - Séchage au four - Partie 2 : teneur totale en eau - Méthode simplifiée (ISO 18134-2:2017) ; Version allemande EN_ISO_18134-2:2017 », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/2637759.

[47] T. Mendel, D. Kuptz, A. Überreiter et H. Hartmann, *Détermination rapide de la teneur en eau des plaquettes de bois*. Straubing : Centre technologique et de promotion du centre de compétence pour les matières premières renouvelables (TFZ), 2017. Consulté le 21 avril 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.tfz.bayern.de/service/presse/186025/index.php

[48] « DIN EN ISO 18122:2016-03, Combustibles solides biogènes - Détermination de la teneur en cendres (ISO_18122:2015) ; version allemande EN_ISO_18122:2015 », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/2316155.

[49] C.A.R.M.E.N. e.V., « Prix du marché des plaquettes de bois ». Consulté le 21 avril 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktpreise-energieholz/marktpreise-hackschnitzel/

[50] M. Mladenović, M. Paprika et A. Marinković, « Denitrification techniques for biomass combustion », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, p. 3350-3364, février 2018, doi : 10.1016/j.rser.2017.10.054.

[51] S. Van Loo et J. Koppejan, éd., *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Londres ; Washington, DC : Earthscan, 2010.

[52] I. Obernberger, *Utilisation de la biomasse solide dans les installations de combustion, avec une attention particulière portée au comportement des éléments générateurs de cendres*. Graz : dbv-Verlag der Technische Universität Graz, 1997. Consulté le 15 avril 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://graz.pure.elsevier.com/en/publications/nutzung-fester-biomasse-in-verbrennungsanlagen-unter-besonderer-b

[53] A. Lauber et T. Nussbaumer, « Utilisation pratique et surveillance des chaudières à bois automatiques équipées de séparateurs électriques », Verenum pour le compte de l'Office fédéral de l'énergie, Berne, rapport final, décembre 2014.

[54] T. Nussbaumer, « Formation de polluants lors de la combustion du bois », thèse de doctorat, ETH Zurich, 1989. doi : 10.3929/ethz-a-000514834.

[55] R. Keller, « Mesures primaires pour la réduction », thèse de doctorat, ETH Zurich, 1994. doi: 10.3929/ethz-a-000945058.

[56] R. Salzmann et T. Nussbaumer, «Fuel Staging for NO x Reduction in Biomass Combustion: Experiments and Modeling», *Energy Fuels - ENERG FUEL*, vol. 15, mai 2001, doi: 10.1021/ef0001383.

[57] T. Nussbaumer, « Primär- und Sekundärmassnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen », dans *Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen : Emissionsminderung, Konzepte und ausgeführte Anlagen*, dans Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen, Emissionsminderung, Konzepte und ausgeführte Anlagen, publication spéciale. , Düsseldorf : Springer-VDI-Verl, 1997, p. 279-308.

[58] H. Fastenaekels et T. Nussbaumer, « Développement d'un système combiné de chauffage par le bas et d'injection pour la régulation de l'air et du combustible », dans *Protection de l'air et protection contre les explosions dans les chauffages au bois et état de la technique en matière de gazéification du bois*, T. Nussbaumer, éd., dans 7e symposium sur l'énergie du bois. , Zurich : Office fédéral de l'énergie OFEN, 2002, p. 89-102.

[59] C. Jirkowsky, R. Pretzl, T. Malzer et K. Sihorsch, « Principes fondamentaux de la séparation des poussières pour les chauffages à biomasse à partir de 100 kW », dans *Protection de l'air et protection contre les explosions dans les chauffages au bois et état de la technique de la gazéification du bois*, T. Nussbaumer, éd., dans 7e symposium sur l'énergie du bois. , Zurich : Office fédéral de l'énergie OFEN, 2002, p. 53-72.

[60] J. Good et T. Nussbaumer, « Détermination du rendement des chauffages au bois », Verenum pour le compte de l'Office fédéral de l'économie énergétique, Berne, rapport final, 1993.

[61] « DIN IEC 60050-351:2014-09, Dictionnaire électrotechnique international - Partie 351 : Technique de contrôle-commande (IEC_60050-351:2013) », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/2159569.

[62] H. R. Gabathuler et H. Mayer, *Circuits standard*,

[63] H. Lutz, W. Wendt, et V. G. & C. Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, *Taschenbuch der Regelungstechnik mit MATLAB und Simulink*. 2019.

[64] W. Böge et W. Plaßmann, éd., « Principes fondamentaux et notions de base de la technique de mesure », dans *Vieweg Handbuch Elektrotechnik: Principes fondamentaux et applications pour les électrotechniciens*, Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2007, p. 735-740. doi : 10.1007/978-3-8348-9217-1_57.

[65] « DIN EN 61131-1:2004-03, Automates programmables industriels - Partie 1 : informations générales (IEC 61131-1:2003); version allemande EN 61131-1:2003 », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/9537680.

[66] « DIN EN 12953-6:2011-05, Chaudières à tubes d'eau - Partie 6 : Exigences relatives à l'équipement de la chaudière ; version allemande EN 12953-6:2011 », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/1719251.

[67] Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V. (DEPV) et Deutsches Pelletinstitut GmbH, éd., *Stockage des granulés de bois - Systèmes de stockage conformes à la norme ENplus*, 5e édition révisée. Berlin : Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V. (DEPV), 2019. Consulté le 4 juin 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://depv.de/p/Broschure-Lagerung-von-Holzpellets-ENplus-konforme-Lagersysteme-hienxHo3uXFMhgnQNT-NyMc

[68] J. Good *et al.*, *Manuel de planification QM Chauffages au bois*, 2e édition légèrement révisée, vol. 4, 5 vol. dans la série QM Chauffages au bois, vol. 4. Straubing : C.A.R.M.E.N. e.V, 2008.
[69] Association professionnelle du bois et du métal (BGHM), « Installations d'aspiration et silos pour la poussière et les plaquettes de bois - Protection contre les incendies et les explosions », Association professionnelle du bois et du métal (BGHM), Mayence, BGI 739-2, juillet 2012. Consulté le 19 novembre 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://publikationen.dguv.de/regelwerk/dguv-informationen/2832/absauganlagen-und-silos-fuer-holzstaub-und-spaene
[70] Association des établissements cantonaux d'assurance incendie AEAI, éd., *Explications relatives à la protection incendie des chaudières à plaquettes 104-15*. dans Explications. Berne : Association des établissements cantonaux d'assurance incendie AEAI, 2015. Consulté le 5 mai 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://services.vkg.ch/rest/public/georg/bs/publikation/documents/BSPUB-1394520214-157.pdf/content
[71] A. Hammerschmid et A. Stallinger, *Circuits standard partie II QM Chauffages au bois*, 1re édition, vol. 5, 5 vol. dans la série QM Chauffages au bois, vol. 5. Straubing : C.A.R.M.E.N. e.V, 2006.
[72] C. U. Brunner, J. Nipkow, P. Gyger et T. Staubli, « Pompes – Les faits essentiels pour le choix et l'utilisation des pompes de refoulement », Topmotors, Zurich, 2012. Consulté le 19 juillet 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.topmotors.ch/sites/default/files/2018-08/D_MB_23_Pumpen.pdf
[73] « FW 218 - Planification, construction et réception des points de mesure pour l'énergie thermique », AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., mars 2020. Consulté le 21 octobre 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.agfw-shop.de/regelwerk/2-warmemessung-und-abrechnung/fw-218c-entwurf-einbau-und-abnahme-von-messgeraeten-fuer-thermische-energie-druckfassung.html
[74] « FW 510 - Exigences relatives à l'eau de circulation des installations de chauffage industriel et à distance et conseils pour leur fonctionnement », AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung GmbH, Francfort-sur-le-Main, fiche de travail, 2013. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.agfw.de/regelwerk/
[75] « Qualité de l'eau pour les installations techniques du bâtiment », Association suisse des ingénieurs en technique du bâtiment SWKI, Urtenen-Schönbühl, directive BT102-01, 2012. Consulté le 15 avril 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://shop.snv.ch/Technische-Regel/Diverses/SWKI-BT102-01/SICC-BT102-01.html?listtype=search&searchparam=BT102-01%20
[76] S. Thalmann, S. Mennel, A. Jenni et T. Nussbaumer, *Guide pour la planification des stations de transfert de chauffage à distance*, version 1.0. Zurich : Verenum AG, 2020. [En ligne]. Disponible à l'adresse : http://www.verenum.ch/Dokumente_QMFW.html
[77] S. Frederiksen et S. Werner, *District heating and cooling*, 1re édition. Lund : Studentliteratur, 2013.
[78] H. Ernst, *Manuel technique sur le chauffage à distance*, 3e édition dans Technique et normalisation. Francfort-sur-le-Main : AGFW, 2013.
[79] « FW 515 - Conditions techniques de raccordement pour l'eau de chauffage (TAB-HW) », AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung GmbH, Francfort-sur-le-Main, fiche technique, 2015. [En ligne]. Disponible sur : https://www.agfw.de/regelwerk/
[80] M. Meyer, « Valorisation des cendres issues de la biomasse comme engrais précieux pour l'agriculture et la sylviculture », Association pour la biomasse de Haute-Autriche, Linz, 2014.
[81] I. Obernberger, « Cendres issues de la combustion de biomasse – caractérisation, traitement et possibilités d'utilisation », présenté lors du 2e colloque sur la valorisation des cendres de biomasse naturelles, Iéna, 2020.
[82] « Le marché des cendres de bois est en plein essor », Holz-Zentralblatt, article de journal, nov. 2015.
[83] M. Jutz, M. Tobler, A. Keel et U. Rhyner, « Projet HARVE - Cendres de bois en Suisse : production, valorisation et élimination », Energie-bois Suisse, Berne, présentation PowerPoint, 2020.
[84] I. Obernberger, « Cendres issues de la combustion de biomasse - Composition et valorisation », dans *Utilisation thermique de la biomasse : technique et mise en œuvre ; congrès de Salzbourg, 23 et 24 avril 1997*, Gesellschaft Energietechnik, éd., dans VDI-Berichte, n° 1319. , Düsseldorf : VDI-Verl, 1997, p. 199-222.
[85] A. Keel, « Évaluation des rapports d'analyse des cendres de bois - non publié ». Énergie-bois Suisse, 2020.
[86] R. Zürcher, « Entsorgung von Aschen und Filterstäuben aus Holzfeuerungen im Kanton Bern », Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse Windisch, mémoire de master MAS, 2016.
[87] B. Müller, « Influence du combustible et du fonctionnement des installations sur la qualité des cendres », présenté lors du 1er colloque suisse sur les cendres de bois, Eschenz, 12 novembre 2020.
[88] A. Keel, « Mise en place de la mise en décharge des cendres de bois selon l'OEB et approches de valorisation », présenté lors du 15e symposium sur l'énergie du bois, ETH Zurich, 14 septembre 2018.
[89] Confédération suisse, *Ordonnance sur la prévention et l'élimination des déchets (Ordonnance sur les déchets, ODE)*, vol. SR 814.600. 2015, p. 50. Consulté le 16 avril 2024. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2015/891/de
[90] Ministère fédéral allemand de la Justice et de la Protection des consommateurs et Office fédéral allemand de la Justice, *Ordonnance relative au catalogue européen des déchets (Ordonnance sur le catalogue des déchets - AVV)*. 2001, p. 32. [En ligne]. Disponible à l'adresse : http://www.gesetze-im-internet.de/avv/BJNR337910001.html
[91] Ministère fédéral allemand de la Justice et de la Protection des consommateurs et Office fédéral allemand de la Justice, *loi sur la promotion de l'économie circulaire et la garantie d'une gestion des déchets respectueuse de l'environnement (KrWG)*. 2012, p. 54. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html

[92] Ministère fédéral allemand de la Justice et de la Protection des consommateurs et Office fédéral allemand de la Justice, *Règlement relatif à la valorisation des biodéchets sur les sols utilisés à des fins agricoles, sylvicoles et horticoles (Règlement sur les biodéchets - BioAbfV)*. 1998, p. 58. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.gesetze-im-internet.de/bioabfv/BJNR295500998.html

[93] Ministère fédéral de la Justice et de la Protection des consommateurs et Office fédéral de la justice, *Règlement relatif aux décharges et aux sites de stockage à long terme (règlement sur les décharges - DepV)*. 2009, p. 64. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.gesetze-im-internet.de/depv_2009/BJNR090010009.html

[94] Ministère fédéral allemand de la Justice et de la Protection des consommateurs et Office fédéral allemand de la Justice, *Règlement relatif à la mise sur le marché d'engrais, d'amendements, de substrats de culture et de produits phytosanitaires1 (Règlement sur les engrais - DüMV)*. 2012, p. 117. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/BJNR248200012.html

[95] Ministère fédéral de la Justice et de la Protection des consommateurs et Office fédéral de la justice, *Loi sur les engrais (DüngG)*. 2009, p. 13. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.gesetze-im-internet.de/d_ngg/BJNR005400009.html

[96] Ministère fédéral allemand de la Justice et de la Protection des consommateurs et Office fédéral allemand de la Justice, *Règlement relatif à l'utilisation d'engrais, d'amendements, de substrats de culture et de produits phytosanitaires selon les principes de bonnes pratiques professionnelles en matière de fertilisation (règlement sur les engrais - DüV)*. 2017, p. 46. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/BJNR130510017.html

[97] Ministère fédéral de la Justice et de la Protection des consommateurs et Office fédéral de la Justice, *Règlement sur la documentation relative à l'élimination des déchets (Nachweisverordnung - NachwV)*. 2006, p. 22. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.gesetze-im-internet.de/nachwv_2007/BJNR229810006.html

[98] H. Reisinger, B. Winter, I. Szednyj, S. Böhmer et T. Janhsen, *Prévention et valorisation des déchets. Cendres, scories et poussières en Autriche*, vol. 0003. dans Rapport, vol. 0003. Vienne : Umweltbundesamt GmbH pour le compte du ministère fédéral de l'Agriculture, des Forêts, de l'Environnement et de la Gestion de l'eau, 2005. Consulté le 9 avril 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.umweltbundesamt.at/studien-reports/publikationsdetail?pub_id=1581&cHash=38c7041b49115f2560a5558691a1a86c

[99] H. Holzner, I. Obernberger et K. Katzensteiner, *Directive pour l'utilisation appropriée des cendres végétales à des fins de valorisation sur les terres agricoles et forestières*, 1re édition. Vienne : Ministère fédéral de l'Agriculture, des Forêts, de l'Environnement et de la Gestion de l'eau, 2011.

[100] Section Équipement technique des bâtiments de l'Association des ingénieurs allemands (VDI), *VDI 2067 Feuille 1 - Rentabilité des installations techniques des bâtiments - Principes fondamentaux et calcul des coûts*. Düsseldorf : Association des ingénieurs allemands (VDI), 2012. Consulté le 18 novembre 2019. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2067-blatt-1-wirtschaftlichkeit-gebaeudetechnischer-anlagen-grundlagen-und-kostenberechnung-1

[101] « Fiche technique ÖKL 67 Planification des centrales de chauffage à biomasse et des réseaux de chauffage à distance », Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung (ÖKL), Vienne, 3e édition, 2016. Consulté le 18 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://oekl.at/publikationen/merkblaetter/mb67/

[102] R. Leemann, « Méthodes d'analyse de rentabilité des systèmes énergétiques ». RAVEL, 1992. Consulté le 12 novembre 2019. [En ligne]. Disponible sur : https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=2ahUKEwixyPSEueXlAhWOZ-MAKHWBjD-QQFjAIegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fwww.energie.ch%2Fbfk%2Fravel%2F12_51_2D.pdf&usg=AOvVaw1eBPjpV0hul1wKlY-Wp-MG

[103] C.A.R.M.E.N. e.V., *SOPHENA – Logiciel de planification de centrales thermiques et de réseaux de chauffage à distance*. GreenDelta GmbH. Consulté le 18 juin 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.carmen-ev.de/service/sophena/

[104] J.-P. Thommen, *Économie d'entreprise et gestion : une approche de l'économie d'entreprise axée sur la gestion*, 10e édition révisée et augmentée. Zurich : Versus, 2016.

[105] AGFW - Association pour l'efficacité énergétique dans le domaine du chauffage, du refroidissement et de la cogénération, « AVBFernwärmeV », Économie énergétique, droit et politique / Droit / AVBFernwärmeV. Consulté le 26 novembre 2019. [En ligne]. Disponible sur : https://www.agfw.de/energiewirtschaft-recht-politik/recht/avbfernwaermev/

[106] « Effiziente Heizwerke, klimaaktiv ». Consulté le 24 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.klimaaktiv.at/erneuerbare/effiziente_heizwerke.html

[107] S. Thalmann, *THENA*. (Juillet 2019). ger. Verenum Dr Thomas Nussbaumer et ARGE QM Fernwärme, Zurich. [Excel]. Disponible à l'adresse : http://www.verenum.ch/Planungshandbuch_QMFW.html

[108] S. Thalmann, *DN-Sensi*. (mars 2021). ger. Verenum AG et ARGE QM Fernwärme, Zurich. [Excel]. Disponible sur : http://www.verenum.ch/Dokumente/FW_Tool_DN-Sensi_V1.3.xlsx

[109] ARGE QM Fernwärme, «QM Fernwärme», QM Fernwärme. Consulté le 9 décembre 2019. [En ligne]. Disponible sur : http://www.verenum.ch/index_QMFW.html

[110] QM Chauffages au bois, « Tableau Excel Relevé de situation QM Chauffages au bois », QM Chauffages au bois. Consulté le 31 décembre 2019. [En ligne]. Disponible sur : https://www.qm-chauffage-bois.ch/releve-de-situation.html l

[111] M. Peters, T. Steidle et H. Böhmisch, *Planification communale du chauffage – Guide pratique*, 400e édition. Stuttgart : KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH, 2020. Consulté le 19 mars 2021. [En

ligne]. Disponible à l'adresse : https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Leitfaden-Kommunale-Waermeplanung-barrierefrei.pdf

[112] P. pour S. SuisseEnergie Communes, sites et régions, « Planification énergétique territoriale », Local Energy. Consulté le 19 mars 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.local-energy.swiss/infobox/raeumliche-energieplanung.html

[113] « Pan-European Thermal Atlas PETA 5.1 ». Consulté le 24 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://euf.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8d51f3708ea54fb9b732ba0c94409133

[114] « THERMOS Tool », THERMOS. Consulté le 24 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.thermos-project.eu/thermos-tool/tool-access/

[115] « Hotmaps Toolbox ». Consulté le 24 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.hotmaps.eu/map

[116] Confédération suisse, « Swiss Geoportal, demande en chaleur et en froid de l'industrie, du logement et des services, ainsi que réseaux thermiques existants », geo.admin.ch. Consulté le 8 août 2024. [En ligne]. Disponible sur : https://map.geo.admin.ch/#/map?lang=de&center=2623787.44,1221298.25&z=1.514&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&topic=ech&swisssearch=W%C3%A4rme-/K%C3%A4ltenachfrage+Industrie&layers=ch.swisstopo.zeitreihen@year=1864,f;ch.bfs.gebaeude_wohnungs_register,f;ch.bav.haltestellen-oev,f;ch.swisstopo.swisstlm3d-wanderwege,f;ch.vbs.schiessanzeigen,f;ch.astra.fermetures_de_sentiers_de_randonnée_déviations,f;ch.bfe.réseaux-thermiques;ch.bfe.demande-de-chauffage-à distance_logements_bâtiments-de-services;ch.bfe.demande-de-chauffage-à distance_industrie

[117] « Base de données webGIS VFS ». Consulté le 24 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch/Dienstleistungen/webGIS.php

[118] « Heat Roadmap Europe ». Consulté le 24 novembre 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://heatroadmap.eu/

[119] « EN ISO 52016-1:2018-04 : Évaluation énergétique des bâtiments - Besoins énergétiques pour le chauffage et le refroidissement, températures intérieures et charges thermiques sensibles et latentes - Partie 1 : Méthodes de calcul (ISO 52016-1:2017) Version allemande EN ISO 52016-1:2017 ; Version suisse SN EN ISO 52016-1 * SIA 380.211 », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/2577376.

[120] « EN 12831-1:2017-09 : Évaluation énergétique des bâtiments - Méthodes de calcul de la charge thermique de référence - Partie 1 : Charge thermique des locaux, module M3-3 ; version allemande EN 12831-1:2017 ; version suisse SN EN 12831-3 * SIA 385.203 », Beuth Verlag GmbH.

[121] T. Nussbaumer, «NOX Reduction in Biomass Combustion. Biomass for Energy and Industry», dans *10th European Conference and Technology Exhibition*, Würzburg, juin 1998, p. 1318–1321.

[122] S. Thalmann, T. Nussbaumer, J. Good et A. Jenni, « Analyse et optimisation des réseaux de chauffage à distance – Analyse de l'état actuel des réseaux de chauffage à distance et outil d'évaluation pour l'optimisation des réseaux », Office fédéral de l'énergie OFEN, Zurich, rapport final, 2013.

[123] « HSLU Software Tools », Haute école de Lucerne. Consulté le 24 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.hslu.ch/de-ch/technik-architektur/ueber-uns/organisation/kompetenzzentren-und-forschungsgruppen/bau/gebaeudetechnik-und-energie/software-tools/

[124] « Stanet Netzberechnung », STANET. Consulté le 24 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : http://stafu.de/de/home.html

[125] « ROKA$^3$ Logiciel de calcul de réseaux de canalisations pour le gaz, l'eau et le chauffage à distance ». Consulté le 24 novembre 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.roka3.de/#

[126] I. Kropp, « SIR 3S – 3S Consult GmbH ». Consulté le 24 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.3sconsult.de/software/sir-3s/

[127] « Le chauffage à distance en bref », Haute école de Lucerne Technique et architecture, Horw, mars 2019. [En ligne]. Disponible sur : https://www.endk.ch/de/ablage/energieberatung/Merkblatt%20Fernwaerme%20in%20Kuerze%2020190502_d.pdf

[128] J. Ködel et D. Hanggartner, « Fallbeispiele ‹Thermische Netze› », Haute école de Lucerne, Horw, résumé, février 2018.

[129] Helge Averfalk *et al.*, *Low-temperature district heating implementation guidebook. Annexe TS2 Implementation of low-temperature district heating systems*. Stuttgart : Fraunhofer Verlag, 2021.

[130] Office fédéral de l'environnement OFEV, « Fiche d'information sur les facteurs d'émission des installations de combustion ». Juin 2015. Consulté le 18 mai 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfo-daten/faktenblatt_emissionsfaktorenfeuerungen.pdf.download.pdf/faktenblatt_emissionsfaktorenfeuerungen.pdf

[131] K. der B. L. der öffentlichen B. KBOB, « Données d'écobilan dans le secteur de la construction 2009/1:2016 ». Janvier 2016. Consulté le 18 mai 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html

[132] T. Nussbaumer, « Erntefaktor von Energiesystemen mit Holzverbrennung » (Facteur de récolte des systèmes énergétiques utilisant la combustion du bois), dans *Wege zur Nachhaltigkeit und Massnahmen zur Emissionsminderung und Wirtschaftlichkeitsverbesserung* (Voies vers la durabilité et mesures de réduction des émissions et d'amélioration de la rentabilité), T. Nussbaumer, éd., dans 8. Holzenergie-Symposium (8e symposium sur l'énergie du bois). , Zurich : Office fédéral de l'énergie OFEN, 2004, p. 7-27.

[133] F. Kessler, N. Knechtle et R. Frischknecht, « Énergie de chauffage à partir de mazout, de gaz naturel ou de bois », Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne, 315, 2000.

[134] L. Krebs et R. Frischknecht, « Life Cycle Assessment of GO based Electricity Mixes of European Countries 2018 », treeze Ltd., Uster, avril 2021. Consulté le 18 mai 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://treeze.ch/projects/case-studies/energy/swiss-electricity-mixes

[135] C. Arpagaus, *Pompes à chaleur haute température : aperçu du marché, état de la technique et potentiels d'application*. Berlin Offenbach : VDE Verlag GmbH, 2019.

[136] Conseil fédéral suisse, *Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de certaines substances, préparations et objets particulièrement dangereux (Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques, ORRChim)*. 2005. [En ligne]. Disponible sur : https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/de

[137] T. Nussbaumer, J. Good, A. Jenni et R. Bühler, « Automatische Holzheizungen - Grundlagen und Technik », Verenum AG ardens GmbH pour le compte de l'Office fédéral de l'énergie, Zurich, 2001.

[138] « Isolation acoustique dans les installations techniques domestiques », EDMZ, Berne, 1988.

[139] A. Moser, *Damit Grünschnitzelsilos keine Gefahr sind – Sicheres Arbeiten*, édition révisée. Lucerne : SUVA, 2015. Consulté le 4 juin 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.suva.ch/de-CH/material/Dokumentationen/damit-gruenschnitzelsilos-keine-gefahr-sind-sicheres-arbeiten

[140] K. H. Weber, *Mise en service d'installations techniques : manuel pratique avec listes de contrôle et exemples*, 5e édition dans VDI-Buch. Springer Vieweg, 2019. doi : 10.1007/978-3-662-59498-8.

[141] « Assistance AQ pour les chauffages au bois - Énergie-bois Suisse ». Consulté le 24 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur : https://www.holzenergie.ch/ueber-holzenergie/qualitaetssicherung/qs-support-holzfeuerungen.html

[142] QM Chauffages au bois, «FAQ 8 Comment évaluer et présenter les données dans le cadre de l'optimisation de l'exploitation ?» 10 février 2015. Consulté le 18 juin 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.qmChauffages au bois.ch/fileadmin/sites/qm/files/06_FAQ/FAQ08.pdf

[143] H. Schrammel, S. Metz, W. Tertschnig et G. Lamers, « Effiziente Biomassenahwärme - Qualitätsmanagement für Heizwerke » (Chaleur locale efficace issue de la biomasse - Gestion de la qualité pour les centrales de chauffage), klimaaktiv qm heizwerke, Gleisdorf, brochure, décembre 2015. Consulté le 18 juin 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.klimaaktiv.at/erneuerbare/effiziente_heizwerke/qmheizwerke/broschuere.html

[144] « Analyse de la qualité des centrales de chauffage à biomasse – C.A.R.M.E.N. e.V. » Consulté le 24 novembre 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.carmen-ev.de/service/dienstleistungen/qualitaetsanalyse-von-biomasseheizwerken/

[145] P. Küttel, *Calcul de rentabilité QMH*. (Mars 2018). ger. QM Chauffages au bois, Zurich. [Excel]. Disponible à l'adresse : https://www.qmChauffages au bois.ch/de/downloads.html

[146] S. Thalmann, *Surconsommation*. (Mai 2020). Allemand, français, italien, anglais. Verenum AG, Zurich. [Excel]. Disponible sur : https://qmthermischenetze.ch/dokumente-tools/

[147] « DIN EN 14394:2008-12, Chaudières - Chaudières à brûleurs à air soufflé - Puissance thermique nominale inférieure ou égale à 10 MW et température de service maximale de 110 °C ; version allemande EN 14394:2005+A1:2008 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1421646.

[148] J. Good, T. Nussbaumer, J. Delcarte et Y. Schenkel, « METHODS FOR EFFICIENCY DETERMINATION FOR BIOMASS HEATING PLANTS AND INFLUENCE OF OPERATION MODE ON PLANT EFFICIENCY », présenté lors de la 2e Conférence mondiale et exposition technologique sur la biomasse pour l'énergie, l'industrie et la protection du climat, Rome, mai 2004, p. 4. Consulté le 29 septembre 2021. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/312308376_METHODS_FOR_EFFICIENCY_DETERMINATION_FOR_BIOMASS_HEATING_PLANTS_AND_INFLUENCE_OF_OPERATION_MODE_ON_PLANT_EFFICIENCY

[149] J. Ködel, G. Oppermann, O. Arnold, M. Büchler et M. Jutzeler, « Guide du chauffage à distance / refroidissement à distance », Association suisse du chauffage à distance pour l'Office fédéral de l'énergie, Niederrohrdorf, rapport final, août 2018. Consulté le 15 août 2019. [En ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch-wAssets/docs/Dienstleistungen/Leitfaden-Fernaerme-Fernkaelte/Fernwaerme_Leitfaden-deutsch.pdf

[150] « DIN EN 1333:2006-06, Brides et leurs raccords - Pièces de tuyauterie - Définition et sélection de PN ; version allemande EN_1333:2006 », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/9658127.

[151] « DIN EN ISO 6708:1995-09, Éléments de tuyauterie - Définition et sélection de DN (diamètre nominal) (ISO_6708:1995) ; version allemande EN_ISO_6708:1995 », Beuth Verlag GmbH. doi : 10.31030/2819641.

# 23 Bibliographie


[1] Eurostat, « Energy balances 2018 ». Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances

[2] A. Camia, N. E. Cazzaniga, R. Jonsson, und D. Palermo, « Sankey diagrams of woody biomass flows in the EU-28. », European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, Brüssel, Broschüre, 2019. Zugegriffen: 28. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: http://publications.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_KJ0119205ENN

[3] European Commission's Knowledge Centre for Bioeconomy, « Sankey diagrams of woody biomass flows in the EU-28 - Years 2009-2015 ». European Commission, 2019. Zugegriffen: 28. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://data.europa.eu/doi/10.2760/227292

[4] N. Scarlat, J.-F. Dallemand, N. Taylor, und M. Banja, « Brief on biomass for energy in the European Union », Publications Office of the European Union, 2019. Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/55047

[5] IEA Data and statistics, « World Energy Balance 2018 », IEA. Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables

[6] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, « World Population Prospects : The 2017 Revision, Data Bookle t», Department of Economic and Social Affairs, Population Division, ST/ESA/SER.A/401, 2017. Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2017_DataBooklet.pdf

[7] R. Palen, « First population estimates - EU population up to nearly 513 million on 1 January 2018 - Increase driven by migration », Eurostat, Brüssel, Newsrelease 115/2018, Juli 2018. Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/energy-balances

[8] U. Kaufmann, « Schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien », Bundesamt für Energie, Bern, Ausgabe 2018, Sep. 2019. Zugegriffen: 28. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/teilstatistiken.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvOTgyOQ==.html

[9] International Renewable Energy Agency IRENA, « Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2019 », International Renewable Energy Agency IRENA, Abu Dhabi, 2019. Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: /publications/2019/Jun/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2019

[10] Observ'ER, « The state of Renewable Energies in Europe - 19th EurObserv'ER Report ». Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: http://www.energies-renouvelables.org/

[11] A. P. C. Faaji, « Securing sustainable resource availability of biomass for energy applications in Europe; review of recent literature », University of Groningen, Groningen, Fachartikel, 2018. Zugegriffen: 22. Januar 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://energy.nl/wp-content/uploads/2019/06/Bio-energy-Europe-EU-Biomass-Resources-Andr%C3%A9-Faaij-Final.pdf

[12] M. Banja, R. Sikkema, M. Jégard, V. Motola, und J.-F. Dallemand, « Biomass for energy in the EU – The support framework », *Energy Policy*, Bd. 131, S. 215–228, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.04.038.

[13] Directorate-General for Energy (European Commission), Trinomics, T. Badouard, und M. Altman, *Energy subsidies: energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments: final report*. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2020. Zugegriffen: 29. September 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://data.europa.eu/doi/10.2833/546611

[14] Europäischer Rechnungshof, Hrsg., *Wurden mit den Mitteln aus dem Fonds der Kohäsionspolitik zur Förderung der Erzeugung erneuerbarer Energien gute Ergebnisse erzielt? gemäß Artikel 287 Absatz 4 Unterabsatz 2 AEUV*. in Sonderbericht / Europäischer Rechnungshof, no. 2014,6. Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, 2014.

[15] R. Bühler, H. R. Gabathuler, und A. Jenni, *Q-Leitfaden QMstandard*, 3. erweiterte Auflage., Bd. 1, 6 Bd. in Schriftenreihe QM Chauffages au bois, vol. 1. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V, 2011. [Online]. Verfügbar unter: https://www.qmChauffages au bois.ch/publikationen.html

[16] S. Thalmann, *Erneuerung Holzenergieanlagen*. (März 2020). ger. Holzenergie Schweiz und ARGE QM Chauffages au bois, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: https://www.qmChauffages au bois.ch/de/downloads.html

[17] ARGE QM Chauffages au bois, « QM-Chauffages au bois », QM-Chauffages au bois. Zugegriffen: 9. Dezember 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.qmChauffages au bois.ch/de/home.html

[18] B. Meier, C. Moser, C. Vogler, und R. Dettli, « Sozioökonomische Aspekte thermischer Netze », econcept AG, Zürich, Schlussbericht, Apr. 2019. Zugegriffen: 18. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.econcept.ch/de/projekte/soziookonomische-aspekte-thermischer-netze/

[19] T. Nussbaumer, S. Thalmann, A. Jenni, und J. Ködel, *Planungshandbuch Fernwärme*, Version 1.2. Zürich: Verenum Dr. Thomas Nussbaumer, 2018. [Online]. Verfügbar unter: http://www.verenum.ch/Planungshandbuch_QMFW.html

[20] L. Küng, P. Kräuchi, und G. Kayser, « Risiken bei thermischen Netzen », BG Ingenieure und Berater AG, Bern, Schlussbericht, Apr. 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.energieschweiz.ch/dech/home.aspx?p=22949,22963,22984,22985

[21] H. Thorwarth, H. Gerlach, L. Rieger, M. Schroth, R. Krichhof, und J. Tejada, « Natürliche Einflüsse auf die Qualität von Holzbrennstoffen und deren Aus-

wirkungen auf den Betrieb von Holz-Heizkraftwerken », *VGB PowerTech J. 112018*, 2018, Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vgb.org/pt_11_18.html

[22] « DIN EN ISO 16993:2016-11, Biogene Festbrennstoffe_- Umwandlung von Analysenergebnissen einer Bezugsbasis in Ergebnisse mit anderer Bezugsbasis (ISO_16993:2016); Deutsche Fassung EN_ISO_16993:2016 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2555895.

[23] « DIN EN ISO 17225-1:2014-09, Biogene Festbrennstoffe_- Brennstoffspezifikationen und -klassen_- Teil_1: Allgemeine Anforderungen (ISO_17225-1:2014); Deutsche Fassung EN_ISO_17225-1:2014 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2073606.

[24] « DIN EN ISO 18125:2017-08, Biogene Festbrennstoffe_- Bestimmung des Heizwertes (ISO_18125:2017); Deutsche Fassung EN_ISO_18125:2017 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2603463.

[25] J. Hahn, M. Schardt, F. Schulmeyer, und F. Mergler, « Energieinhalt von Holz », Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising, Merkblatt 12, 2014. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lwf.bayern.de/service/publikationen/lwf_merkblatt/022952/index.php

[26] F. Kollmann, « Holz und Feuchtigkeit Teil 2: Freies Wasser, Schwinden und Quellen, Eigenschaftsänderungen, Holzfeuchtigkeit und Schädlinge, Heizwert », *Holz-Zentralblatt*, S. 1428–1429, 1982.

[27] M. Kaltschmitt, H. Hartmann, und H. Hofbauer, Hrsg., *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 3., Aktualisierte und Erweiterte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.

[28] « DIN EN ISO 17827-1:2016-10, Biogene Festbrennstoffe_- Bestimmung der Partikelgrößenverteilung für unkomprimierte Brennstoffe_- Teil_1: Horizontales Rüttelsiebverfahren mit Sieben mit einer Lochgröße von 3,15_mm und darüber (ISO_17827-1:2016); Deutsche Fassung EN_ISO_17827-1:2016 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2360044.

[29] D. Kuptz, E. Dietz, K. Schreiber, C. Schön, R. Mack, und H. Hartmann, *Holzhackschnitzel aus dem Kurzumtrieb - Brennstoffqualität und Verbrennungsverhalten*. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 2018. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tfz.bayern.de/service/presse/186025/index.php

[30] M. Kern, T. Raussen, K. Funda, A. Lootsma, und H. Hofmann, *Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz*. in Texte, no. 43/2010. Dessau-Rosslau: Umweltbundesamt, 2010. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aufwand-nutzen-einer-optimierten

[31] L. Eltrop und Universität Stuttgart, Hrsg., *Leitfaden feste Biobrennstoffe: Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im mittleren und großen Leistungsbereich*, 4., Vollst. überarb. Aufl. Gülzow-Prüzen: FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V, 2014.

[32] H. Thorwarth, M. Wöhler, und S. Rieder, « Influence of Road Salt on Chemical Properties of Road Side Biomass », gehalten auf der 25th European Biomass Conference and Exhibition, Stockholm, 12. Juni 2017.

[33] H. Thorwarth und M. Scheuber, « Die Qualität bestimmt die Grenzen der Kaskadennutzung von Altholz », *MÜLL ABFALL*, Nr. 3, S. 6, März 2020, doi: 10.37307/j.1863-9763.2020.03.06.

[34] P. O. of the E. Union, *Beschluss der Kommission vom 18. Dezember 2014 zur Änderung der Entscheidung 2000/532/EG über ein Abfallverzeichnis gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates Text von Bedeutung für den EWR*. Publications Office of the European Union, 2014. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: http://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/bb120f99-8ff5-11e4-b8a5-01aa75ed71a1/language-de/format-PDFA1A

[35] Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), *Verordnung des UVEK über Listen zum Verkehr mit Abfällen*. 2005. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/714/de

[36] Schweizerische Eidgenossenschaft, *Luftreinhalte-Verordnung (LRV)*, Bd. 814.318.142.1. 1985, S. 96. Zugegriffen: 12. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19850321/index.html

[37] N. Hofmann, T. Mendel, D. Kuptz, F. Schulmeyer, H. Borchert, und H. Hartmann, *Lagerung von Holzhackschnitzeln - Trockenmasseverluste, Änderungen der Brennstoffqualität und Kosten*. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 2017. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tfz.bayern.de/service/presse/186025/index.php

[38] W. Becke, C. Fink, M. Hamilton-Jones, R. Pertschy, und C. Rohringer, « Monitoring-Ergebnisse von grossen Solarthermie-Anlagen für Trocknungsanwendungen », in *Tagungsunterlagen Online-Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme*, Connexio GmbH, Hrsg., Connexio GmbH, 2021, S. 196–207.

[39] W. Emhofer, « Emissions from wood pellets during storage », Thesis, 2015. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/3701

[40] « Phyllis2 - Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar ». Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://phyllis.nl/

[41] «FRED - Feste Regenerative Energieträger Datenbank». Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fred.bayern.de/

[42] H. Thorwarth, « Validierung und Automatisierung der Brennstoffanalytik in einem Heizwerk », gehalten auf der 16. Fachkongress Holzenergie, Augsburg, 2016.

[43] L. Lasselsberger, *Kleinfeuerungen für Holz – Verbrennungstechnik/Stand der Technik/Regelwerke/Entwicklung*. Wieselburg: Bundesanstalt für Landtechnik, 2000.

[44] D. Kuptz, F. Schulmeyer, K. Hüttl, E. Dietz, H. Borchert, und H. Hartmann, *Optimale Bereitstellungverfahren für Holzhackschnitzel*. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 2015. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tfz.bayern.de/service/presse/186025/index.php

[45] « DIN EN ISO 18134-1:2015-12, Biogene Festbrennstoffe_- Bestimmung des Wassergehaltes_-Ofentrocknung_- Teil_1: Gesamtgehalt an Wasser_- Referenzverfahren (ISO_18134-1:2015); Deutsche Fassung EN_ISO_18134-1:2015 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2311530.

[46] « DIN EN ISO 18134-2:2017-05, Biogene Festbrennstoffe_- Bestimmung des Wassergehaltes_-_Ofentrocknung_- Teil_2: Gesamtgehalt an Wasser_- Vereinfachtes Verfahren (ISO_18134-2:2017); Deutsche Fassung EN_ISO_18134-2:2017 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2637759.

[47] T. Mendel, D. Kuptz, A. Überreiter, und H. Hartmann, *Schnellbestimmung des Wassergehalts von Holzhackschnitzeln*. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 2017. Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tfz.bayern.de/service/presse/186025/index.php

[48] « DIN EN ISO 18122:2016-03, Biogene Festbrennstoffe_- Bestimmung des Aschegehaltes (ISO_18122:2015); Deutsche Fassung EN_ISO_18122:2015 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2316155.

[49] C.A.R.M.E.N. e.V., « Marktpreise Hackschnitzel ». Zugegriffen: 21. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktpreise-energieholz/marktpreise-hackschnitzel/

[50] M. Mladenović, M. Paprika, und A. Marinković, « Denitrification techniques for biomass combustion », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Bd. 82, S. 3350–3364, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.10.054.

[51] S. Van Loo und J. Koppejan, Hrsg., *The handbook of biomass combustion and co-firing*. London ; Washington, DC: Earthscan, 2010.

[52] I. Obernberger, *Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens aschebildender Elemente*. Graz: dbv-Verlag der Technische Universität Graz, 1997. Zugegriffen: 15. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://graz.pure.elsevier.com/en/publications/nutzung-fester-biomasse-in-verbrennungsanlagen-unter-besonderer-b

[53] A. Lauber und T. Nussbaumer, « Praxiseinsatz und Überwachung von automatischen Holzfeuerungen mit Elektroabscheider », Verenum im Auftrag Bundesamt für Energie, Bern, Schlussbericht, Dez. 2014.

[54] T. Nussbaumer, « Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz », Doctoral Thesis, ETH Zurich, 1989. doi: 10.3929/ethz-a-000514834.

[55] R. Keller, « Primärmassnahmen zur NOx_Minderung bei der Holzverbrennung mit dem Schwerpunkt der Luftstufung », Doctoral Thesis, ETH Zurich, 1994. doi: 10.3929/ethz-a-000945058.

[56] R. Salzmann und T. Nussbaumer, « Fuel Staging for NO x Reduction in Biomass Combustion: Experiments and Modeling », *Energy Fuels - ENERG FUEL*, Bd. 15, Mai 2001, doi: 10.1021/ef0001383.

[57] T. Nussbaumer, « Primär- und Sekundärmassnahmen zur Stickoxidminderung bei Holzfeuerungen », in *Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen: Emissionsminderung, Konzepte und ausgeführte Anlagen*, in Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertug von Holz und Holzabfällen, Emissionsminderung, Konzepte und ausgeführte Anlagen, Sonderpublikation, Düsseldorf: Springer-VDI-Verl, 1997, S. 279–308.

[58] H. Fastenaekels und T. Nussbaumer, « Entwicklung einer kombinierten Unterschub- und Einblasfeuerung zur Luft- und Brennstoffstufung », in *Luftreinhaltung und Explosionsschutz bei Holzfeuerungen und Stand der Technik der Holzvergasung*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 7. Holzenergie-Symposium. , Zürich: Bundesamt für Energie BfE, 2002, S. 89–102.

[59] C. Jirkowsky, R. Pretzl, T. Malzer, und K. Sihorsch, « Grundlagen der Staubabscheidung für Biomassefeuerungen ab 100 kW », in *Luftreinhaltung und Explosionsschutz bei Holzfeuerungen und Stand der Technik der Holzvergasung*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 7. Holzenergie-Symposium. , Zürich: Bundesamt für Energie BfE, 2002, S. 53–72.

[60] J. Good und T. Nussbaumer, «Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen», Verenum im Auftrag Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, Schlussbericht, 1993.

[61] « DIN IEC 60050-351:2014-09, Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch_- Teil_351: Leittechnik (IEC_60050-351:2013) », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2159569.

[62] H. R. Gabathuler und H. Mayer, *Standard-Schaltungen Teil I QM Chauffages au bois*, 2. erweiterte Auflage., Bd. 2, 5 Bd. in Schriftenreihe QM Chauffages au bois, vol. 2. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V, 2010.

[63] H. Lutz, W. Wendt, und V. G. & C. Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, *Taschenbuch der Regelungstechnik mit MATLAB und Simulink*. 2019.

[64] W. Böge und W. Plaßmann, Hrsg., «Grundlagen und Grundbegriffe der Meßtechnik», in *Vieweg Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2007, S. 735–740. doi: 10.1007/978-3-8348-9217-1_57.

[65] « DIN EN 61131-1:2004-03, Speicherprogrammierbare Steuerungen_- Teil_1: Allgemeine Informationen (IEC_61131-1:2003); Deutsche Fassung EN_61131-1:2003 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/9537680.

[66] « DIN EN 12953-6:2011-05, Großwasserraumkessel - Teil 6: Anforderungen an die Ausrüstung für den Kessel; Deutsche Fassung EN 12953-6:2011 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1719251.

[67] Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V. (DEPV) und Deutsches Pelletinstitut GmbH, Hrsg., *Lagerung von Holzpellets - ENplus-konforme Lagersysteme*, 5. überarbeitete Auflage. Berlin: Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V. (DEPV), 2019. Zugegriffen: 4. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://depv.de/p/Broschure-Lagerung-von-

Holzpellets-ENplus-konforme-Lagersysteme-hienxHo3uXFMhgnQNTNyMc

[68] J. Good *u. a.*, *Planungshandbuch QM Chauffages au bois*, 2. leicht überarbeitete Auflage., Bd. 4, 5 Bd. in Schriftenreihe QM Chauffages au bois, vol. 4. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V, 2008.

[69] Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM), « Absauganlagen und Silos für Holzstaub und -späne - Brand- und Explosionsschutz », Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM), Mainz, BGI 739-2, Juli 2012. Zugegriffen: 19. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://publikationen.dguv.de/regelwerk/dguv-informationen/2832/absauganlagen-und-silos-fuer-holzstaub-und-spaene

[70] Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF, Hrsg., *Brandschutzerläuterung Spänefeuerungen 104-15.* in Erläuterungen. Bern: Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF, 2015. Zugegriffen: 5. Mai 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://services.vkg.ch/rest/public/georg/bs/publikation/documents/BSPUB-1394520214-157.pdf/content

[71] A. Hammerschmid und A. Stallinger, *Standard-Schaltungen Teil II QM Chauffages au bois*, 1. Auflage., Bd. 5, 5 Bd. in Schriftenreihe QM Chauffages au bois, vol. 5. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V, 2006.

[72] C. U. Brunner, J. Nipkow, P. Gyger, und T. Staubli, « Pumpen - Die wichtigsten Fakten zur Auswahl und zum Einsatz von Förderpumpen », Topmotors, Zürich, 2012. Zugegriffen: 19. Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.topmotors.ch/sites/default/files/2018-08/D_MB_23_Pumpen.pdf

[73] « FW 218 - Planung, Bau und Abnahme von Messstellen für thermische Energie », AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., März 2020. Zugegriffen: 21. Oktober 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agfw-shop.de/regelwerk/2-warmemessung-und-abrechnung/fw-218c-entwurf-einbau-und-abnahme-von-messgeraeten-fuer-thermische-energie-druckfassung.html

[74] « FW 510 - Anforderungen an das Kreislaufwasser von Industrie- und Fernwärmeheizanlagen sowie Hinweise für deren Betrieb », AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung GmbH, Frankfurt am Main, Arbeitsblatt, 2013. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agfw.de/regelwerk/

[75] « Wasserbeschaffenheit für Gebäudetechnik-Anlagen », Schweizerischer Verein von Gebäudetechnik-Ingenieuren SWKI, Urtenen-Schönbühl, Richtlinie BT102-01, 2012. Zugegriffen: 15. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://shop.snv.ch/Technische-Regel/Diverses/SWKI-BT102-01/SICC-BT102-01.html?listtype=search&searchparam=BT102-01%20

[76] S. Thalmann, S. Mennel, A. Jenni, und T. Nussbaumer, *Leitfaden zur Planung von Fernwärme-Übergabestationen*, Version 1.0. Zürich: Verenum AG, 2020. [Online]. Verfügbar unter: http://www.verenum.ch/Dokumente_QMFW.html

[77] S. Frederiksen und S. Werner, *District heating and cooling*, 1. Auflage. Lund: Studentliteratur, 2013.

[78] H. Ernst, *Technisches Handbuch Fernwärme*, 3. Aufl. in Technik und Normung. Frankfurt am Main: AGFW, 2013.

[79] « FW 515 - Technische Anschlussbedingungen Heizwasser (TAB-HW) », AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung GmbH, Frankfurt am Main, Merkblatt, 2015. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agfw.de/regelwerk/

[80] M. Meyer, « Verwertung von Biomasseaschen als wertvoller Dünger für die Land- und Forstwirtschaft », Biomasseverband OÖ, Linz, 2014.

[81] I. Obernberger, « Aschen aus Biomassefeuerungen - Charakterisierung, Aufbereitung und Verwendungsmöglichkeiten », gehalten auf der 2. Fachgespräch zur Verwertung naturbelassener Biomasseaschen, Jena, 2020.

[82] « Markt für Holzasche befindet sich im Entstehen », Holz-Zentralblatt, Zeitungsartikel, Nov. 2015.

[83] M. Jutz, M. Tobler, A. Keel, und U. Rhyner, «Projekt HARVE - Holzaschen in der Schweiz: Aufkommen, Verwertung und Entsorgung», Holzenergie Schweiz, Bern, PP-Präsentation, 2020.

[84] I. Obernberger, « Aschen aus Biomassefeuerungen - Zusammensetzung und Verwertung », in *Thermische Biomassenutzung: Technik und Realisierung; Tagung Salzburg, 23. und 24. April 1997*, Gesellschaft Energietechnik, Hrsg., in VDI-Berichte, no. 1319. , Düsseldorf: VDI-Verl, 1997, S. 199–222.

[85] A. Keel, «Auswertung Analyseberichte Holzaschen - unveröffentlicht». Holzenergie Schweiz, 2020.

[86] R. Zürcher, « Entsorgung von Aschen und Filterstäuben aus Holzfeuerungen im Kanton Bern », Fachhochschule Nordwestschweiz Windisch, Masterthesis MAS, 2016.

[87] B. Müller, « Einfluss von Brennstoff und Anlagenbetrieb auf die Aschequalität », gehalten auf der 1. Schweizer Holzaschen Fachtagung, Eschenz, 12. November 2020.

[88] A. Keel, « Etablierung der Deponierung von Holzaschen nach VVEA und Ansätze zur Verwertung », gehalten auf der 15. Holzenergie-Symposium, ETH Zürich, 14. September 2018.

[89] Schweizerische Eidgenossenschaft, *Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA)*, Bd. SR 814.600. 2015, S. 50. Zugegriffen: 16. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2015/891/de

[90] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamts für Justiz, *Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV)*. 2001, S. 32. [Online]. Verfügbar unter: http://www.gesetze-im-internet.de/avv/BJNR337910001.html

[91] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamts für Justiz, *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (KrWG)*. 2012, S. 54. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html

[92] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamts für Justiz, *Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung - BioAbfV)*. 1998, S. 58. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/bioabfv/BJNR295500998.html

[93] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamts für Justiz, *Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV)*. 2009, S. 64. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/depv_2009/BJNR090010009.html

[94] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamts für Justiz, *Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln1 (Düngemittelverordnung - DüMV)*. 2012, S. 117. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/d_mv_2012/BJNR248200012.html

[95] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamts für Justiz, *Düngegesetz (DüngG)*. 2009, S. 13. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/d_ngg/BJNR005400009.html

[96] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamts für Justiz, *Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV)*. 2017, S. 46. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/d_v_2017/BJNR130510017.html

[97] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz und Bundesamts für Justiz, *Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen (Nachweisverordnung - NachwV)*. 2006, S. 22. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/nachwv_2007/BJNR229810006.html

[98] H. Reisinger, B. Winter, I. Szednyj, S. Böhmer, und T. Janhsen, *Abfallvermeidung und -verwertung. Aschen, Schlacken und Stäube in Österreich.*, Bd. 0003. in Report, vol. 0003. Wien: Umweltbundesamt GmbH i.A. für Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2005. Zugegriffen: 9. April 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.at/studien-reports/publikationsdetail?pub_id=1581&cHash=38c7041b49115f2560a5558691a1a86c

[99] H. Holzner, I. Obernberger, und K. Katzensteiner, *Richtlinie für den sachgerechten Einsatz von Pflanzenaschen zur Verwertung auf land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen*, 1. Auflage. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2011.

[100] VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, *VDI 2067 Blatt 1 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung*. Düsseldorf: VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2012. Zugegriffen: 18. November 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2067-blatt-1-wirtschaftlichkeit-gebaeudetechnischer-anlagen-grundlagen-und-kostenberechnung-1

[101] « ÖKL-Merkblatt 67 Planung von Biomasseheizwerken und Nahwärmenetzen », Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung (ÖKL), Wien, 3. Auflage, 2016. Zugegriffen: 18. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://oekl.at/publikationen/merkblaetter/mb67/

[102] R. Leemann, « Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalyse von Energiesystemen ». RAVEL, 1992. Zugegriffen: 12. November 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=2ahUKEwixyPSEueXlAhWOZMAKHWBjD-QQFjAIegQIARAC&url=https%3A%2F%2Fwww.energie.ch%2Fbfk%2Fravel%2F12_51_2D.pdf&usg=AOvVaw1eBPjpV0hul1wKlY-Wp-MG

[103] C.A.R.M.E.N. e.V., *SOPHENA – Software zur Planung von Heizwerken und Nahwärmenetzen*. GreenDelta GmbH. Zugegriffen: 18. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.carmen-ev.de/service/sophena/

[104] J.-P. Thommen, *Betriebswirtschaft und Management: Eine managementorientierte Betriebswirtschaftslehre*, 10., Überarbeitete und Erweiterte Auflage. Zürich: Versus, 2016.

[105] AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., « AVBFernwärmeV », Energiewirtschaft, Recht & Politik / Recht / AVBFernwärmeV. Zugegriffen: 26. November 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agfw.de/energiewirtschaft-recht-politik/recht/avbfernwaermev/

[106] « Effiziente Heizwerke, klimaaktiv ». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.klimaaktiv.at/erneuerbare/effiziente_heizwerke.html

[107] S. Thalmann, *THENA*. (Juli 2019). ger. Verenum Dr. Thomas Nussbaumer und ARGE QM Fernwärme, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: http://www.verenum.ch/Planungshandbuch_QMFW.html

[108] S. Thalmann, *DN-Sensi*. (März 2021). ger. Verenum AG und ARGE QM Fernwärme, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: http://www.verenum.ch/Dokumente/FW_Tool_DN-Sensi_V1.3.xlsx

[109] ARGE QM Fernwärme, « QM Fernwärme », QM-Fernwärme. Zugegriffen: 9. Dezember 2019. [Online]. Verfügbar unter: http://www.verenum.ch/index_QMFW.html

[110] QM-Chauffages au bois, « Tableau Excel Relevé de situation QM-Chauffages au bois », QM Chauffages au bois. Consulté : 31 décembre 2019. [Online]. Disponible sous : https://www.qm-chauffage-bois.ch/releve-de-situation.html

[111] M. Peters, T. Steidle, und H. Böhmisch, *Kommunale Wärmeplanung - Handlungsleitfaden*, 400. Aufl. Stuttgart: KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH, 2020. Zugegriffen: 19. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Leitfaden-Kommunale-Waermeplanung-barrierefrei.pdf

[112] P. für S. EnergieSchweiz Gemeinden, Areale und Regionen, «Räumliche Energieplanung», Local Energy. Zugegriffen: 19. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.local-energy.swiss/infobox/raeumliche-energieplanung.html

[113] « Pan-European Thermal Atlas PETA 5.1 ». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://euf.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=8d51f3708ea54fb9b732ba0c94409133

[114] « THERMOS Tool », THERMOS. Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.thermos-project.eu/thermos-tool/tool-access/

[115] « Hotmaps Toolbox ». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hotmaps.eu/map

[116] Schweizerische Eidgenossenschaft, «Swiss Geoportal, Wärme- und Kältenachfrage von Industrie, Wohnen und Dienstleistungen sowie bestehende thermische Netze», geo.admin.ch. Zugegriffen: 8. August 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://map.geo.admin.ch/#/map?lang=de&center=2623787.44,1221298.25&z=1.514&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&topic=ech&swisssearch=W%C3%A4rme-/K%C3%A4ltenachfrage+Industrie&layers=ch.swisstopo.zeitreihen@year=1864,f;ch.bfs.gebaeude_wohnungs_register,f;ch.bav.haltestellen-oev,f;ch.swisstopo.swisstlm3d-wanderwege,f;ch.vbs.schiessanzeigen,f;ch.astra.wanderland-sperrungen_umleitungen,f;ch.bfe.thermische-netze;ch.bfe.fernwaerme-nachfrage_wohn_dienstleistungsgebaeude;ch.bfe.fernwaerme-nachfrage_industrie

[117] « webGIS Datenbank VFS ». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch/Dienstleistungen/webGIS.php

[118] « Heat Roadmap Europe ». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://heatroadmap.eu/

[119] « EN ISO 52016-1:2018-04: Energetische Bewertung von Gebäuden - Energiebedarf für Heizung und Kühlung, Innentemperaturen sowie fühlbare und latente Heizlasten - Teil 1: Berechnungsverfahren (ISO 52016-1:2017) Deutsche Fassung EN ISO 52016-1:2017; Schweizerische Fassung SN EN ISO 52016-1 * SIA 380.211 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2577376.

[120] « EN 12831-1:2017-09: Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017; Schweizerische Fassung SN EN 12831-3 * SIA 385.203 », Beuth Verlag GmbH.

[121] T. Nussbaumer, « NOX Reduction in Biomass Combustion. Biomass for Energy and Industry », in *10th European Conference and Technology Exhibition*, Würzburg, Juni 1998, S. 1318–1321.

[122] S. Thalmann, T. Nussbaumer, J. Good, und A. Jenni, « Analyse und Optimierung von Fernwärmenetzen – Ist-Analyse von Fernwärmenetzen und Bewertungs-Tool zur Netz-Optimierung », Bundesamt für Energie BfE, Zürich, Schlussbericht, 2013.

[123] « HSLU Software Tools », Hochschule-Luzern. Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hslu.ch/de-ch/technik-architektur/ueber-uns/organisation/kompetenzzentren-und-forschungsgruppen/bau/gebaeudetechnik-und-energie/software-tools/

[124] « Stanet Netzberechnung », STANET. Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: http://stafu.de/de/home.html

[125] « ROKA$^3$ Rohrnetzberechnungssoftware für Gas, Wasser und Fernwärme ». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.roka3.de/#

[126] I. Kropp, « SIR 3S – 3S Consult GmbH ». Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.3sconsult.de/software/sir-3s/

[127] « Fernwärme in Kürze », Hochschule Luzern Technik und Architektur, Horw, März 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.endk.ch/de/ablage/energieberatung/Merkblatt%20Fernwaerme%20in%20Kuerze%2020190502_d.pdf

[128] J. Ködel und D. Hanggartner, « Fallbeispiele ‹Thermische Netze› », Hochschule Luzern, Horw, Zusammenfassung, Feb. 2018.

[129] Helge Averfalk *u. a.*, *Low-temperature district heating implementation guidebook. Annex TS2 Implementation of low-temperature district heating systems*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2021.

[130] Bundesamt für Umwelt BAFU, « Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen ». Juni 2015. Zugegriffen: 18. Mai 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfo-daten/faktenblatt_emissionsfaktorenfeuerungen.pdf.download.pdf/faktenblatt_emissionsfaktorenfeuerungen.pdf

[131] K. der B. L. der öffentlichen B. KBOB, «Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2016». Januar 2016. Zugegriffen: 18. Mai 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html

[132] T. Nussbaumer, « Erntefaktor von Energiesystemen mit Holzverbrennung », in *Wege zur Nachhaltigkeit und Massnahmen zur Emissionsminderung und Wirtschaftlichkeitsverbesserung*, T. Nussbaumer, Hrsg., in 8. Holzenergie-Symposium. , Zürich: Bundesamt für Energie BfE, 2004, S. 7–27.

[133] F. Kessler, N. Knechtle, und R. Frischknecht, « Heizenergie aus Heizöl, Erdgas oder Holz », Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 315, 2000.

[134] L. Krebs und R. Frischknecht, « Life Cycle Assessment of GO based Electricity Mixes of European Countries 2018 », treeze Ltd., Uster, Apr. 2021. Zugegriffen: 18. Mai 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://treeze.ch/projects/case-studies/energy/swiss-electricity-mixes

[135] C. Arpagaus, *Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale*. Berlin Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2019.

[136] Schweizerische Bundesrat, *Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV)*. 2005. [Online].

Verfügbar unter: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/de

[137] T. Nussbaumer, J. Good, A. Jenni, und R. Bühler, « Automatische Holzheizungen - Grundlagen und Technik », Verenum AG ardens GmbH i.A. für Bundesamt für Energie, Zürich, 2001.

[138] « Schallschutz in Haustechnikanlagen », EDMZ, Bern, 1988.

[139] A. Moser, *Damit Grünschnitzelsilos keine Gefahr sind – Sicheres Arbeiten*, Überarbeitete Auflage. Luzern: SUVA, 2015. Zugegriffen: 4. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.suva.ch/de-CH/material/Dokumentationen/damit-gruenschnitzelsilos-keine-gefahr-sind-sicheres-arbeiten

[140] K. H. Weber, *Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen: Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen*, 5. Aufl. in VDI-Buch. Springer Vieweg, 2019. doi: 10.1007/978-3-662-59498-8.

[141] « QS-Support Chauffages au bois - Energie-bois Suisse ». Consulté : 24 novembre 2021. [Online]. Disponible sous : https://www.energie-bois.ch/services/qs-support-chauffages-au-bois

[142] QM Chauffages au bois, « FAQ 8 Wie soll die Beurteilung und die Darstellung der Daten in der Betriebsoptimierung erfolgen? » 10. Februar 2015. Zugegriffen: 18. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.qmChauffages au bois.ch/fileadmin/sites/qm/files/06_FAQ/FAQ08.pdf

[143] H. Schrammel, S. Metz, W. Tertschnig, und G. Lamers, « Effiziente Biomassenahwärme - Qualitätsmanagement für Heizwerke », klimaaktiv qm heizwerke, Gleisdorf, Broschüre, Dez. 2015. Zugegriffen: 18. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.klimaaktiv.at/erneuerbare/effiziente_heizwerke/qmheizwerke/broschuere.html

[144] « Qualitätsanalyse von Biomasseheizwerken – C.A.R.M.E.N. e.V. » Zugegriffen: 24. November 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.carmen-ev.de/service/dienstleistungen/qualitaetsanalyse-von-biomasseheizwerken/

[145] P. Küttel, *QMH-Wirtschaftlichkeitsrechnung*. (März 2018). ger. QM Chauffages au bois, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: https://www.qmChauffages au bois.ch/de/downloads.html

[146] S. Thalmann, *Mehrverbrauch*. (Mai 2020). Deutsch, Francais, Italiano, English. Verenum AG, Zürich. [Excel]. Verfügbar unter: https://qmthermischenetze.ch/dokumente-tools/

[147] « DIN EN 14394:2008-12, Heizkessel - Heizkessel mit Gebläsebrennern - Nennwärmeleistung kleiner oder gleich 10 MW und einer maximalen Betriebstemperatur von 110 °C; Deutsche Fassung EN 14394:2005+A1:2008 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/1421646.

[148] J. Good, T. Nussbaumer, J. Delcarte, und Y. Schenkel, « METHODS FOR EFFICIENCY DETERMINATION FOR BIOMASS HEATING PLANTS AND INFLUENCE OF OPERATION MODE ON PLANT EFFICIENCY », gehalten auf der 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rom, Mai 2004, S. 4. Zugegriffen: 29. September 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/312308376_METHODS_FOR_EFFICIENCY_DETERMINATION_FOR_BIOMASS_HEATING_PLANTS_AND_INFLUENCE_OF_OPERATION_MODE_ON_PLANT_EFFICIENCY

[149] J. Ködel, G. Oppermann, O. Arnold, M. Büchler, und M. Jutzeler, « Leitfaden Fernwärme / Fernkälte », Verband Fernwärme Schweiz für Bundesamt für Energie, Niederrohrdorf, Schlussbericht, Aug. 2018. Zugegriffen: 15. August 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.fernwaerme-schweiz.ch/fernwaerme-deutsch-wAssets/docs/Dienstleistungen/Leitfaden-Fernaerme-Fernkaelte/Fernwaerme_Leitfaden-deutsch.pdf

[150] « DIN EN 1333:2006-06, Flansche und ihre Verbindungen_- Rohrleitungsteile_- Definition und Auswahl von_PN; Deutsche Fassung EN_1333:2006 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/9658127.

[151] « DIN EN ISO 6708:1995-09, Rohrleitungsteile_- Definition und Auswahl von DN (Nennweite) (ISO_6708:1995); Deutsche Fassung EN_ISO_6708:1995 », Beuth Verlag GmbH. doi: 10.31030/2819641.



www.qm-chauffage-bois.ch
www.qmholzheizwerke.ch