



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS
« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

GUIDE

LES CHAUFFERIES AU BOIS

DÉCEMBRE 2015

NEUF-RENOVATION

ÉDITO

Le Grenelle Environnement a fixé pour les bâtiments neufs et existants des objectifs ambitieux en matière d'économie et de production d'énergie. Le secteur du bâtiment est engagé dans une mutation de très grande ampleur qui l'oblige à une qualité de réalisation fondée sur de nouvelles règles de construction.

Le programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » a pour mission, à la demande des Pouvoirs Publics, d'accompagner les quelque 370 000 entreprises et artisans du secteur du bâtiment et l'ensemble des acteurs de la filière dans la réalisation de ces objectifs.

Sous l'impulsion de la CAPEB et de la FFB, de l'AQC, de la COPREC Construction et du CSTB, les acteurs de la construction se sont rassemblés pour définir collectivement ce programme. Financé dans le cadre du dispositif des certificats d'économies d'énergie grâce à des contributions importantes d'EDF (15 millions d'euros) et de GDF SUEZ (5 millions d'euros), ce programme vise, en particulier, à mettre à jour les règles de l'art en vigueur aujourd'hui et à en proposer de nouvelles, notamment pour ce qui concerne les travaux de rénovation. Ces nouveaux textes de référence destinés à alimenter le processus normatif classique seront opérationnels et reconnus par les assureurs dès leur approbation ; ils serviront aussi à l'établissement de manuels de formation.

Le succès du programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » repose sur un vaste effort de formation initiale et continue afin de renforcer la compétence des entreprises et artisans sur ces nouvelles techniques et ces nouvelles façons de faire. Dotées des outils nécessaires, les organisations professionnelles auront à cœur d'aider et d'inciter à la formation de tous.

Les professionnels ont besoin rapidement de ces outils et « règles du jeu » pour « réussir » le Grenelle Environnement.

Alain MAUGARD

Président du Comité de pilotage du Programme
« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »
Président de QUALIBAT



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS

« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

Ce programme est une application du Grenelle Environnement. Il vise à revoir l'ensemble des règles de construction, afin de réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

AVANT- PROPOS

Afin de répondre au besoin d'accompagnement des professionnels du bâtiment pour atteindre les objectifs ambitieux du Grenelle Environnement, le programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » a prévu d'élaborer les documents suivants :

Les **Recommandations Professionnelles** « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents techniques de référence, préfigurant un avant-projet NF DTU, sur une solution technique clé améliorant les performances énergétiques des bâtiments. Leur vocation est d'alimenter soit la révision d'un NF DTU aujourd'hui en vigueur, soit la rédaction d'un nouveau NF DTU. Ces nouveaux textes de référence seront reconnus par les assureurs dès leur approbation.

Les **Guides** « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents techniques sur une solution technique innovante améliorant les performances énergétiques des bâtiments. Leur objectif est de donner aux professionnels de la filière les règles à suivre pour assurer une bonne conception, ainsi qu'une bonne mise en œuvre et réaliser une maintenance de la solution technique considérée. Ils présentent les conditions techniques minimales à respecter.

Les **Calepins de chantier** « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des mémentos destinés aux personnels de chantier, qui illustrent les bonnes pratiques d'exécution et les dispositions essentielles des Recommandations Professionnelles et des Guides « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 ».

Les **Rapports** « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » présentent les résultats soit d'une étude conduite dans le cadre du programme, soit d'essais réalisés pour mener à bien la rédaction de Recommandations Professionnelles ou de Guides.

Les **Recommandations Pédagogiques** « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont des documents destinés à alimenter la révision des référentiels de formation continue et initiale. Elles se basent sur les éléments nouveaux et/ou essentiels contenus dans les Recommandations Professionnelles ou Guides produits par le programme.

L'ensemble des productions du programme d'accompagnement des professionnels « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » est mis gratuitement à disposition des acteurs de la filière sur le site Internet du programme : <http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr>

Sommaire

1 - Domaine d'application 7

2 - La ressource biomasse 9

2.1. • Définition.....	9
2.2. • La composition chimique.....	11
2.3. • La combustion du bois.....	12
2.4. • Les combustibles bois.....	13
2.5. • Spécificités du combustible bois.....	14
2.5.1. • L'humidité ou la teneur en eau.....	14
2.5.2. • La granulométrie.....	16
2.5.3. • Le pouvoir calorifique.....	17
2.5.4. • La teneur en cendres.....	18
2.5.5. • La masse volumique de bois plein et la masse volumique apparente.....	19
2.6. • Le contrat d'approvisionnement.....	20
2.6.1. • Engagement du fournisseur.....	21
2.6.2. • Nature du combustible.....	21
2.6.3. • Quantité de combustible.....	22
2.6.4. • Livraison du combustible.....	22
2.6.5. • Enlèvements des sous-produits de combustion.....	23
2.7. • Les procédures de contrôle.....	23
2.7.1. • Présence de corps étrangers.....	24
2.7.2. • Granulométrie.....	24
2.7.3. • Humidité.....	24
2.7.4. • Pouvoir calorifique.....	25

3 - Description et conception des solutions techniques 26

3.1. • Le silo de stockage.....	26
3.1.1. • Principe.....	26
3.1.2. • Le séchage.....	27
3.1.3. • Les configurations de stockage.....	27
3.1.4. • Alimentation du silo de stockage.....	32
3.2. • L'alimentation : le transfert silo-foyer.....	34
3.2.1. • Dessilage – Extraction du combustible.....	34
3.2.2. • Les différents modes de transfert.....	37
3.2.3. • Système d'introduction dans le foyer.....	40
3.3. • Le foyer.....	41
3.4. • La chaudière.....	43
3.5. • Le décendrage.....	43
3.5.1. • Cas d'un système de décendrage manuel.....	45
3.5.2. • Cas d'un système de décendrage automatique.....	45
3.6. • L'évacuation des produits de combustion.....	47
3.6.1. • Typologie des conduits de fumée.....	47
3.6.2. • Techniques pour le traitement des fumées.....	47
3.6.3. • Traitement acoustique.....	48



4 - Le dimensionnement de la chaufferie bois.....	49
4.1. • L'importance du dimensionnement	49
4.2. • Le choix de la solution technique : mono-énergie ou en bi-énergie	50
4.2.1. • Une installation mono-énergie pour des puissances inférieures à 200 kW	51
4.2.2. • Une installation bi-énergie pour des puissances supérieures à 200 kW	51
5 - Calcul de la puissance à installer	54
5.1. • La puissance maximale de chauffage.....	54
5.2. • La puissance maximale pour l'eau chaude sanitaire	55
5.3. • La puissance moyenne pour l'eau chaude sanitaire.....	55
5.4. • La puissance bois à installer	55
5.4.1. • Cas d'une installation mono-énergie	55
5.4.1. • Cas d'une installation bi-énergie	56
5.5. • La puissance d'appoint à installer	57
5.6. • Les températures de relève et limite.....	58
5.6.1. • La température de relève	58
5.6.2. • La température limite	58
5.7. • Le volume du silo de stockage à installer.....	59
5.7.1. • Analyse contextuelle	59
5.7.2. • Analyse multifactorielle	59
5.7.3. • Détermination du volume de stockage.....	60
5.8. • La quantité annuelle de cendres à prévoir.....	63
6 - Le génie civil.....	65
6.1. • Le local chaufferie	65
6.2. • Le silo de stockage.....	70
7 - Le circuit hydraulique.....	82
7.1. • Les composants hydrauliques et de sécurité	82
7.2. • Le ballon d'hydroaccumulation.....	83
7.3. • Exemples de schémas hydrauliques.....	87
8 - La régulation	91
8.1. • Régulation du taux de charge de la chaudière.....	91
8.2. • Régulation de la combustion	93
8.3. • Régulation du débit d'extraction des fumées.....	95
9 - Les automatismes et sécurités.....	97
9.1. • La commande des automatismes.....	97
9.2. • Les sécurités.....	98
10 - L'évacuation des produits de combustion	99
10.1. • Matériaux	99
10.2. • Plaque signalétique.....	100
10.3. • Implantation	101
10.4. • Raccordement des générateurs au conduit de fumée	102
10.5. • Dimensionnement du conduit de fumée	103
10.6. • Dispositions destinées à limiter la pollution atmosphérique.....	103
10.7. • Seuils réglementaires de rejets	105
10.8. • Les solutions pour le traitement des fumées.....	106



11 - Gestion et valorisation des cendres de bois 110

11.1. • Origine des cendres	110
11.2. • Caractéristiques physico-chimiques.....	111
11.3. • Réglementation.....	113
11.3.1. • La logique produit.....	113
11.3.2. • La logique déchets.....	114
11.4. • Quantité de cendres récupérables	115
11.5. • Influence du type de bois utilisé.....	116
11.6. • Le stockage des cendres	116
11.6.1. • Les solutions de stockage des cendres	116
11.6.2. • Les équipements pour le stockage des cendres	117
11.7. • Les solutions possibles pour la valorisation des cendres.....	119

12 - L'Entretien et la maintenance..... 120

12.1. • L'état des lieux	120
12.2. • Le contrat	120
12.3. • Les obligations réglementaires.....	122
12.4. • Les opérations d'entretien et de maintenance	123
12.5. • Le livret de chaufferie	125



Domaine d'application

1



Cet ouvrage traite des chaufferies bois dédiées à un ou à quelques bâtiments, pour des puissances thermiques installées cumulées inférieures à 2 MW et utilisant uniquement de la biomasse à l'état naturel. Ce guide exclut les chaufferies encadrées par la réglementation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) – Rubrique 2910 combustion, à savoir les installations de puissance supérieure ou égale à 2 MW ou 0,1 MW pour le bois faiblement adjuvanté.

Il s'agit d'identifier les bonnes pratiques, notamment sur les aspects de maintenance et d'exploitation, en complément des éléments de conception et de mise en œuvre, en réponse aux pratiques constatées et aux difficultés rencontrées par les professionnels.

Sans prétendre à l'exhaustivité ou à donner des « recettes », ce guide valorise les savoir-faire en présentant les choix et solutions retenus et réalisés par les Maitres d'Ouvrage et leurs équipes (architectes, bureaux d'études, entreprises) sur des opérations existantes.

Cet ouvrage s'adresse aux entreprises du bâtiment. Il comprend un guide technique qui présente les « points clés » spécifiques aux chaufferies bois dédiées au bâtiment en matière de conception, dimensionnement, installation et exploitation, illustrés par des exemples concrets issus de projets existants.

Les principales questions abordées au fil du guide :

Sur le plan réglementaire :

Quel impact des différents textes réglementaires et normatifs sur un projet de chaufferie bois ?



En matière de conception et de dimensionnement :

- Quelles typologies pour le conduit de fumée ?
- Quelles techniques pour le traitement des fumées ?
- Quel type d'installation préconiser ? Chaufferie mono ou bi-énergie ?
- Quels schémas hydrauliques types proposer ?
- Quelle puissance installer ?
- Quelle solution pour le silo de stockage mettre en œuvre ? Quel volume de silo à prévoir ?
- Quelles solutions pour le stockage des cendres ? Quelle quantité de cendres à évacuer ?

En matière d'installation :

- Quelles règles ou exigences pour le local chaufferie et celui de stockage et d'alimentation ?
- Comment réaliser la ventilation du silo de stockage ?

En matière d'exploitation :

- Quelles procédures d'intervention privilégier ? Quelles opérations d'entretien et de maintenance réaliser ?
- Quelle solution pour la gestion et la valorisation des cendres ?

La ressource biomasse

2



Le choix d'utiliser le combustible bois comme source d'énergie principale s'inscrit dans une démarche de conception globale et transversale dans la chronologie du montage d'un projet.

Le concepteur doit être en mesure d'évaluer l'envergure et la nature des filières d'approvisionnement existantes sur le territoire (régionales, départementales, locales au sein d'une filière agricole ou encore en auto approvisionnement) en fonction de la gamme de puissance de la future installation.

Il doit préconiser une technologie (de système d'extraction, d'alimentation et de foyer notamment) adaptée aux combustibles disponibles localement et pressentis comme susceptibles d'approvisionner l'installation.

2.1. • Définition

La biomasse, au sens de la réglementation ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement), « se présente à l'état naturel et n'est ni imprégnée, ni revêtue d'une substance quelconque ». Cette définition inclut :

- a) les produits composés d'une matière végétale agricole ou forestière susceptible d'être employée comme combustible en vue d'utiliser son contenu énergétique ;
- b) les déchets ci-après :
 - i. déchets végétaux agricoles et forestiers ;
 - ii. déchets végétaux provenant du secteur industriel de la transformation alimentaire, si la chaleur produite est valorisée ;
 - iii. déchets végétaux fibreux issus de la production de pâte vierge et de la production de papier à partir de pâte, s'ils sont



- co-incinérés sur le lieu de production et si la chaleur produite est valorisée ;
- iv. déchets de liège ;
 - v. déchets de bois, à l'exception des déchets de bois qui sont susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds à la suite d'un traitement avec des conservateurs du bois ou du placement d'un revêtement, y compris notamment les déchets de bois de ce type provenant de déchets de construction ou de démolition.

Le décret n° 2013-814 du 11 septembre 2013, transposition en droit français de la directive européenne 2010/75/UE de novembre 2010 relative aux émissions industrielles, modifie la nomenclature des installations classées et donc les règles de classement et d'approvisionnement des installations de combustion dans la nomenclature ICPE.

La rubrique 2910 définit les différents types de biomasse et le régime dont elles relèvent (Figure 1). La nature des combustibles et la puissance de l'installation définissent la procédure applicable à l'installation : autorisation, déclaration ou enregistrement.

Type de biomasse		Rubrique ICPE	Régime administratif	
Matière végétale agricole ou forestière ; déchets végétaux agricoles et forestiers ; déchets de liège ; connexes de scierie ; biomasse issue de déchets au sens de l'article L. 541-4-3 du Code de l'environnement	a), b)i, b)iv, connexes de scierie b)v, déchets de bois avec sortie du statut de déchet	2910-A	P>20 MW	Autorisation
			2<P<20 MW	Déclaration
Déchets végétaux du secteur industriel de la transformation alimentaire ; déchets végétaux fibreux (industrie papetière) ; déchets de bois propres	b)ii, b)iii, b)v, autres déchets avec sortie du statut de déchet	2910-B	P>20 MW	Autorisation
			0,1<P<20 MW	Enregistrement

La puissance thermique définie est la puissance thermique nominale correspondant à la puissance thermique fixée et garantie par le fabricant exprimée en pouvoir calorifique inférieur et susceptible d'être consommée en marche continue.

▲ Figure 1 : Répartition des différents types de biomasse entre les sous-rubriques 2910-A et 2910-B. La nature des combustibles et la puissance de l'installation définissent la procédure applicable à l'installation : autorisation ou déclaration

Si le déchet est de la biomasse b)ii, b)iii et b)v (au sens « 2910 »), l'installation incinérant ces déchets doit être classée en 2910-B.

Commentaire

Avant le décret du 11 septembre 2013, tous les bois inclus dans la définition de la biomasse étaient brûlés dans les mêmes types de chaudières : celles classées en 2910-A.

Si le déchet est « traité/trié » avant combustion dans une plateforme respectant les conditions d'un arrêté Sortie du Statut de Déchet (SSD), l'installation de combustion peut être classée en 2910-A. L'arrêté du 29 juillet 2014 fixe les critères de Sortie du Statut de Déchet pour les

broyats d'emballage en bois pour un usage comme combustibles de type biomasse dans une installation de combustion.

Pour les installations de combustion existantes (antérieures au 16 octobre 2014) qui utilisent des broyats d'emballage en bois, il existe deux solutions :

- rester en chaufferie classée 2910-A utilisant du broyats d'emballages en bois et exiger de ses fournisseurs de présenter les nécessaires attestations de sortie du statut de déchet pour les broyats d'emballages en bois utilisés afin de maintenir les approvisionnements existants ;
- se déclarer en préfecture pour passer en enregistrement et évoluer vers un régime 2910-B (en bénéficiant du principe d'antériorité qui laisse 1 an aux installations existantes pour se signaler).

Evoluer vers un enregistrement implique des contraintes administratives et des contraintes à l'exploitation importantes avec, par exemple, un contrôle annuel (ou toutes les 1000 tonnes consommées) de la qualité des combustibles déchets de bois, un contrôle de la qualité des cendres volantes deux fois par an, un contrôle en continu des émissions dans l'air...

Commentaire

Les déchets de bois susceptibles de contenir des composés organiques halogénés ou des métaux lourds ou un revêtement doivent être brûlés en incinérateurs (rubrique 167-C).

2.2. • La composition chimique

Le bois se compose d'une fraction organique et d'une fraction minérale. La composition chimique des différentes essences de bois est approximativement la même. En ce qui concerne les principaux composants, les proportions moyennes du bois anhydre sont les suivantes :

- pour la fraction organique du combustible :
 - carbone : 49 à 50% ;
 - oxygène : 43 à 44% ;
 - hydrogène : 6% ;
 - azote : 0,2 à 0,5%.
- pour la fraction minérale du combustible : cendres contenues dans le bois ou provenant des impuretés accrochées aux écorces (taux moyen de cendres compris entre 0,5 à 1,5% suivant l'essence de bois, la partie de l'arbre considérée et la nature du sol sur lequel il a poussé). Par nature, les matières minérales ne brûlent pas.



Commentaire

L'état anhydre signifie que le bois est complètement sec. Dans la pratique, le bois contient entre 10 et 70% d'eau.

Le bois se distingue des autres combustibles par trois particularités importantes qui influent sur la qualité de la combustion et sur la conception des générateurs :

- une forte teneur en oxygène dans le bois : la combustion libère l'oxygène, qui l'alimente. Le bois demande donc moins d'air pour sa combustion neutre ;
- une forte teneur en matières volatiles, libérées par la pyrolyse, qui se consomment alors sous forme de gaz. Le bois dégage 85% de sa masse en matières volatiles ;
- une teneur en eau variable importante, de 10 à 70% d'humidité sur brut.



La combustion neutre du bois est celle qui met en jeu les quantités exactes de bois et d'air comburant pour que la réaction chimique ait lieu. En pratique, le mélange combustible/air n'étant pas parfait, il faut toujours introduire un excès d'air supérieur à celui théoriquement suffisant pour éviter la production de CO.

2.3. • La combustion du bois

La combustion est le résultat de la réaction chimique exothermique entre l'oxygène contenue dans le bois et dans l'air comburant et les éléments carbonés du bois. Elle s'effectue en trois étapes :

- le séchage (jusqu'à 150°C) : c'est la phase d'évaporation de l'eau contenue dans le bois ;
- la pyrolyse (de 150 à 600°C) : c'est la transformation en molécules complexes des constituants du bois. Cette phase est importante et permet aux réactions ultérieures de se réaliser pour assurer une bonne combustion. Le résidu après la pyrolyse est le charbon de bois ;
- l'oxydation (de 400 à 1300°C) : c'est la réaction chimique proprement dite entre les gaz produits par la pyrolyse et l'oxygène comburant d'une part, le charbon de bois et l'oxygène comburant d'autre part. L'énergie calorifique est libérée au cours de l'oxydation.

La combustion réelle se fait soit avec :

- un excès d'air, la combustion est dite oxydante ;
- un défaut d'air, la combustion est dite réductrice.



Avec un défaut d'air, la combustion ne peut pas être complète. Les émissions polluantes sont importantes et le rendement de combustion est faible (augmentation des pertes de chaleur par imbrûlés gazeux tels que le CO).

La combustion oxydante tend vers une combustion complète lorsque le mélange entre l'air et le combustible est homogène. Cependant, l'excès d'air représente un vecteur de calories inutile vers l'extérieur au sein des fumées. S'il est trop important, le rendement de combustion est faible du fait de l'augmentation des pertes par chaleur sensible dans les fumées.

On distingue deux types de polluants issus de la combustion :

- les émissions inévitables résultant de la combustion complète du bois : dioxyde de carbone (CO₂), eau (H₂O), cendres, azote (N₂), oxygène (O₂) ;
- les imbrûlés qui résultent d'une combustion incomplète du bois : monoxyde de carbone (CO), hydrocarbures (HC), particules imbrûlées solides (composés organiques des poussières), vapeurs d'acide issues de la phase de pyrolyse.

2.4. • Les combustibles bois

Les combustibles bois peuvent être classés en regard de leurs caractéristiques : humidité, granulométrie et masse volumique notamment. Six catégories de combustibles, relativement homogènes, peuvent être distinguées :

- les écorces ;
- les sciures humides ;
- les plaquettes humides et sèches ;
- le broyat de bois de rebut ;
- les copeaux et sciures sèches ;
- les granulés.

Commentaire

Les combustibles de ces différentes catégories (hors granulés) peuvent être mélangés pour obtenir un combustible de granulométrie, d'humidité et de masse volumique moyennes.

La provenance de ces combustibles peut être :

- d'origine forestière : exploitation de la forêt, taillis à courte et très courte rotation, bois bocager ou urbain ;
- d'origine industrielle : produit de la 1^{ère} et de la 2^{ème} transformation du bois ;
- déchets (Classes A, B et C)



	Origine forestière	Origine industrielle		Déchets de bois propres (Classe A)
		1 ^{ère} transformation du bois	2 ^{ème} transformation du bois	
Écorces		x		
Sciures humides		x		
Plaquettes	humides	x	x	
	sèches	x	x	x
Broyat de bois de rebut				x
Copeaux et sciures sèches			x	
Granulés de bois		x	x	

Les bois de Classe A sont des bois propres non traités et non souillés (emballages lourds de type palettes ou légers de type cagettes, cageots...). Sous réserve d'une sortie de statut de déchets, ils peuvent être brûlés en chaufferie.

▲ Figure 2 : Provenance et origine des différentes catégories de combustibles bois

Pour des raisons économiques mais souvent culturelles et idéologiques, le bois déchiqueté est plus souvent préconisé pour le chauffage collectif et tertiaire. Néanmoins la solution granulés de bois apparaît dans certains cas comme une alternative à étudier de près.

Généralement de faibles puissances (inférieures à 50 kW), les chaudières granulés se sont développées progressivement pour répondre au marché du collectif et tertiaire et notamment pour :

- les bâtiments de taille réduite (moins de 1000 MWh de consommation annuelle) ;
- dans des sites à fortes contraintes (de livraison ou d'implantation) ;
- dans les bâtiments à forte intermittente, du type scolaire et tertiaire ;
- pour des chauffages d'appoint sur un réseau de chaleur bois plaquettes.

2.5. • Spécificités du combustible bois

2.5.1. • L'humidité ou la teneur en eau

Le taux d'humidité ou la teneur en eau est un paramètre crucial du combustible bois. Il varie continuellement. Il dépend d'une multitude de paramètres tels que l'essence, l'époque d'abattage, le temps de stockage en forêt, les conditions météorologiques, le lieu de stockage (abri, scierie).



Le plus souvent, lorsque l'on parle d'humidité du bois, il s'agit d'humidité sur brut. Elle est exprimée en % et est définie comme suit : $H_{\text{brut}} = \text{masse d'eau contenue dans le bois} / \text{masse brute ou totale de bois}$.



La teneur en eau du combustible impacte :

- le **choix technologique de la chaudière** (foyer à combustible sec ou humide) : en brûlant, un combustible bois sec produit beaucoup plus de chaleur qu'un combustible bois humide. Dans les foyers destinés à brûler du bois humide, les parois sont garnies de réfractaire pour augmenter la température de la chambre de combustion ;
- la **gamme de puissance** de la chaudière retenue : la puissance délivrée par une chaudière bois est directement proportionnelle à l'humidité du combustible. Il faut contrôler la bonne adéquation entre l'humidité demandée et la puissance chaudière attendue. Il est préconisé un combustible sec pour une puissance inférieure à 500 kW et humide ou sec pour une puissance supérieure à 500 kW ;
- la **conservation du bois** : un combustible est considéré comme stable au stockage lorsqu'il contient moins de 30% d'humidité sur masse brute. Au-delà, des risques de fermentation et d'incendie peuvent subvenir si la ventilation du stockage n'est pas suffisante ;
- la **masse volumique apparente du bois** : plus le combustible est humide, plus il est « lourd » et plus le système d'alimentation doit être robuste ;
- le **contenu énergétique** : plus le combustible est humide, plus le pouvoir calorifique (quantité de chaleur que la partie combustible du bois peut dégager) du bois est faible.

L'humidité en % de masse brute de différents combustibles est donnée dans le tableau (Figure 3). Elle est mise en regard de la puissance de la chaudière ainsi que de la technologie du foyer de la chaudière.

Humidité sur masse brut (%)	Combustible	Gamme de puissance indicative (kW) et technologie de foyer
5 à 20 (humidité faible)	Sciures sèches et copeaux Granulés de sciures Bois de rebut, produits finis secs	Jusqu'à 500 kW et foyer à combustible sec
25 à 40 (humidité moyenne)	Plaquettes forestières Bois de rebut en forêt	
45 à 70 (humidité forte)	Écorces brutes Écorces broyées et calibrées Sciures vertes Plaquettes papetières Chutes bois et taquets	De 500 à 2000 kW et foyer à combustible humide

▲ Figure 3 : Humidité des combustibles bois



La puissance délivrée par une chaudière bois est directement proportionnelle à l'humidité du combustible. Le cahier des charges d'approvisionnement en combustible doit spécifier l'humidité moyenne attendue sur masse brute. Des valeurs limites (hautes et basses) doivent être précisées.

Commentaire

Le réglage initial de la combustion est effectué pour l'humidité maximale du bois utilisé.

2.5.2. • La granulométrie

La granulométrie du combustible bois est un paramètre primordial dans le choix de l'installation de chauffage depuis le lieu de stockage jusqu'au type de foyer utilisé.

La granulométrie de différents combustibles est donnée dans le tableau (Figure 4). Elle est mise en regard de la puissance de la chaudière ainsi que de la technologie d'alimentation de la chaudière.

Granulométrie	Combustible	Gamme de puissance indicative (kW) et technologie de foyer
Faible	Écorces broyées et calibrées Sciures sèches et copeaux Granulés de sciures Plaquettes forestières	Jusqu'à 500 kW et technologie d'alimentation de type vis
Forte	Écorces brutes Plaquettes papetières Chutes de bois et taquets Bois de rebut en forêt Bois de rebut, produits finis secs	De 500 à 2000 kW et technologie de type racleurs et piston

▲ Figure 4 : Granulométrie des combustibles bois



Plus la granulométrie du combustible est homogène, plus le système d'alimentation, et d'extraction, du combustible est simple.

La granulométrie est un paramètre important du contrat d'approvisionnement. Les dimensions de combustible attendues doivent être précisées en fonction de la gamme de puissance retenue et de la technologie d'alimentation de la chaudière (vis ou racleur avec piston poussoir).



Le contrat d'approvisionnement doit stipuler la valeur limite autorisée pour :

- les grands morceaux (queue de déchetage), en précisant la longueur maximale à ne pas dépasser et le pourcentage autorisé dans le combustible (en % de la masse brute) ;
- les fines (poussières), en précisant leur calibre (par exemple, particules traversant un tamis à grille ronde d'1 mm de diamètre) et le pourcentage autorisé dans le combustible (en % de la masse brute).



▲ Figures 5 : Fractions fines à limiter

2.5.3. • Le pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique du bois est la quantité de chaleur que la partie combustible du bois peut dégager. Il est défini en Pouvoir Calorifique Supérieur (PCS) ou Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI).

Le PCS est l'énergie thermique libérée comprenant la chaleur sensible et la chaleur latente de vaporisation de l'eau, généralement produite par la combustion.

Le PCI est l'énergie thermique libérée comprenant uniquement la chaleur sensible. Il correspond à la chaleur maximale disponible dans une chaudière classique où les gaz de combustion sont évacués sans être condensés.

Le PCI du bois anhydre est fonction de son essence, de sa teneur en cendres et en impuretés.

Le PCI de différentes essences de bois est donné dans le tableau (Figure 6).

Pour un combustible bois humide, lors de la combustion, l'eau contenue dans le bois doit être portée à sa température de vaporisation et la vapeur produite portée à la température des gaz du foyer. Cette phase, appelée phase de séchage, demande une certaine quantité d'énergie et explique pourquoi le PCI varie en sens inverse de l'humidité. A partir du PCI anhydre, il est possible de déterminer le PCI du bois pour une humidité donnée.

$$PCI_{\text{humidité en \%}} = PCI_{\text{état anhydre}} \times (100 - H_{\text{humidité en \%}}) / 100 - 5,835 \times H_{\text{humidité en \%}}$$



Essences	PCI (kWh/kg)	
	État anhydre (humidité nulle)	État brut (humidité de 20%)
Chêne	4,93	3,82
Hêtre	4,87	3,78
Charme	4,95	3,84
Orme	5,13	3,98
Frêne	4,94	3,83
Peuplier	4,80	3,72
Sapin	5,37	4,18
Pin	5,32	4,14
Mélèze	5,19	4,03

▲ Figure 6 : Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) pour différentes essences de combustibles bois

Commentaire

Un résineux contient plus de calories qu'un feuillu pour une même masse de bois et une même humidité. Il brûle aussi plus vite et entraîne une plus grande élévation de la température au foyer.

2.5.4. • La teneur en cendres

La teneur en cendres varie de 0,2 à 10% suivant l'essence du bois, la partie de l'arbre considérée et la nature du sol sur lequel il a poussé.

On donne dans le tableau (Figure 7), les teneurs globales en cendres d'origine minérale pour différentes essences de bois et différentes parties de l'arbre.

Essences	Teneurs globales en cendre d'origine minérale (%)
Résineux	0,6
Chêne, aulne	1,3
Bouleau	1,4
Hêtre, charme, peuplier	1,5
Ecorces	5 à 10
Dosses, délignures	0,6
Sciures	0,5
Bois de branche	0,3 à 2
Bois de tronc	0,3 à 1,3

▲ Figure 7 : Teneurs globales en cendre d'origine minérale pour différentes essences de bois et différentes parties de l'arbre

Les matières minérales contenues dans le bois peuvent être :

- internes, c'est à dire faisant partie intégrante du combustible. Elles représentent en général 1% au plus de la masse ;
- externes, c'est à dire provenant de corps étrangers ramassés au cours des diverses manipulations subies par le produit en forêt ou en scierie. Elles peuvent représenter 5 à 10% de la masse dans des combustibles tels que les écorces.



Une teneur en cendres élevée ne favorise pas une bonne combustion. Des problèmes techniques liés à un taux de cendres plus ou moins important du combustible bois sont les suivants :

- la formation de mâchefers dans le foyer ;
- l'encrassement des surfaces d'échange ;
- l'entraînement de cendres volantes, source de pollution ;
- l'évacuation des cendres.

2.5.5. • La masse volumique de bois plein et la masse volumique apparente

La masse volumique du bois dépend essentiellement de l'essence du bois brûlé.

La masse volumique de bois plein correspond au rapport entre la masse de bois et le volume réel occupé (en prenant compte uniquement du bois massif).

Commentaire

La masse volumique est la masse de combustible (en kilogramme) par unité de volume (en mètre cube) à une température de 15°C.

Applicable aux produits foisonnants, **la masse volumique apparente** correspond à la masse d'une certaine quantité de produits, divisée par le volume occupé, y compris l'air entre les morceaux de bois.

Le tableau (Figure 8) donne la masse volumique de différentes essences pour une humidité d'environ 15 à 20%.

Essences	Masse volumique anhydre moyenne (kg/m ³ de bois)
Bois durs : bouleau, châtaignier, chêne, frêne, hêtre, orme	650
Bois moyens : aulne, pin, mélèze, douglas	550
Bois tendres : épicéa, peuplier, sapin	450

▲ Figure 8 : Masse volumique anhydre moyenne pour différentes essences de bois

Dans la pratique et pour le calcul de dimensionnement du silo de stockage, c'est la masse volumique apparente du bois qu'il faut prendre en compte. La masse volumique apparente est la masse volumique pour un Mètre cube Apparent de bois (MAP). Elle dépend du tassement des produits, de la granulométrie du combustible, de son humidité et de la masse volumique de l'essence considérée. S'il s'agit de granulés ou d'écorces par exemple, la masse réelle de bois contenue dans un mètre cube n'est pas la même. Il est important de tenir compte de ce paramètre lors de transactions mesurées à l'unité de volume.

On donne dans le tableau (Figure 9), un ordre de grandeur de la masse volumique apparente pour différents types de combustibles bois en fonction de leur humidité moyenne.



Produits	Humidité (*)	Masse volumique apparente (kg/MAP)
Écorces brutes	Forte	400 à 700
Écorces calibrées et broyées	Forte	400 à 700
Sciures sèches et copeaux	Faible	130 à 225
Plaquettes forestières	Moyenne	400

(*) Humidité faible : 5 à 20% – Humidité moyenne : 25 à 40% – Humidité forte : 45 à 70%

▲ **Figure 9** : Masse volumique apparente pour différents types de combustibles bois en fonction de leur humidité moyenne

Connaissant la masse volumique apparente d'un combustible à une humidité donnée (H), on peut déterminer sa masse volumique apparente pour une humidité différente (H'). On a :

$$M_{H'} = (100-H')/(100-H) \times (M_H - 10 \times H) + 10 \times H'$$

Avec :

- $M_{H'}$: masse volumique apparente du bois à une humidité donnée ;
- M_H : masse volumique apparente du bois à une humidité différente ;
- H et H' : humidités relatives en %.

Le coefficient de foisonnement est le rapport entre le volume apparent et le volume de bois plein. On peut retenir, en première approche, les coefficients de foisonnement donnés (Figure 10).

Combustibles bois	Coefficient de foisonnement moyen
Broyat	2,5 à 3,5
Plaquettes calibrées (moyennes)	2 à 3
Plaquettes calibrées (fines)	2 à 3
Copeaux	5 à 6
Sciures	2 à 3
Granulés	0,7 à 0,9

▲ **Figure 10** : Coefficient de foisonnement pour différents types de combustibles bois



Plus le coefficient de foisonnement est important, plus le transport et le stockage sont d'un coût élevé.

2.6. • Le contrat d'approvisionnement

Une fois les équipements bois choisis (technologie, puissance et marque), il est indispensable de rédiger un cahier des charges d'approvisionnement en combustibles adapté. Ce document traduit précisément les caractéristiques du combustible requis (granulométrie, humidité, suivie de la prestation, modalités de livraison...).

2.6.1. • Engagement du fournisseur

Le cahier des charges doit définir le périmètre des prestations du fournisseur qui comprend au minimum la fourniture de combustible bois. L'acheteur peut également demander la reprise et le traitement des résidus de combustion (cendres sous foyer et, le cas échéant, fines de filtration).

L'acheteur doit garantir l'exclusivité de la fourniture au titulaire.

2.6.2. • Nature du combustible

Le cahier des charges doit préciser la nature des combustibles autorisés dans l'installation. Une liste des produits acceptés est rédigée. Il peut être livré :

- de la plaquette FBU (Forestière et/ou Bocagère ou Urbaine) ;
- de la plaquette de scierie ;
- de l'écorce (éventuellement pour les installations de puissance supérieure à 700/800 kW) ;
- du broyat de bois d'emballage.

Les écorces et les broyats ne doivent jamais être livrés sur les installations équipées d'un système de dessilage à plateau rotatif et de vis. Sur les autres (échelles de racleurs et piston poussoir), elles ne doivent être acceptées qu'en mélange avec un ou plusieurs des autres produits ligneux listés ci-dessus.

Le cahier des charges doit exclure les refus de compostage comme combustible.

Le combustible doit être exempt de tous corps étrangers et de morceaux de bois peints et/ou traités (métaux lourds ou produits organohalogénés) ou de tout autre élément combustible n'entrant pas dans la définition réglementaire de la biomasse.

Commentaire

Le bois et ses dérivés sont encore trop souvent considérés comme un déchet dont il faut se débarrasser. On peut retrouver divers matériaux et défauts dans le bois livré. Ces produits entravent la mécanique et perturbent la combustion.

Les spécifications techniques devant être mentionnées dans les clauses du contrat sont les suivantes :

- l'humidité sur brut moyenne et maximale % ;
- la granulométrie moyenne et maximale en % ;
- le pourcentage de poussières fines maximal admis ;
- le taux de cendre global maximal admis ;
- l'essence des différents combustibles bois.





Afin de palier aux aléas météorologiques, les valeurs spécifiques peuvent être indiquées avec une variation possible en % pour chaque saison.

Commentaire

La teneur en eau est déterminée en laboratoire après passage dans une étuve à 105°C pendant 48 heures d'un échantillon de combustible. Il existe également des appareils portables (hygromètre à bois) pour déterminer le taux d'humidité d'un morceau de bois avec une assez bonne précision. La distance entre les deux électrodes (environ 3 cm) limite l'utilisation de ces appareils à des combustibles de granulométrie moyenne ou forte.

2.6.3. • Quantité de combustible

Le cahier des charges doit fournir :

- le tonnage de combustible consommé annuellement, voire mensuellement ;
- le pouvoir calorifique moyen du bois demandé.

La puissance délivrée par une chaudière bois est directement proportionnelle à l'humidité du combustible. Il faut contrôler la bonne adéquation entre l'humidité demandée et la puissance chaudière attendue.

2.6.4. • Livraison du combustible

Le cahier des charges doit fournir :

- les modalités de déclenchement de la commande de combustible (exemple : téléphone, fax, message électronique ou autre) ;
- les délais de livraison demandés (24h, 48h ou plus) ;
- les cas de conflit (délais non respectés).

Les conditions de livraisons sont expliquées en fonction de la configuration du site qui peut être précisée (aire de retournement, capacité du silo, système de couverture...). Elles définissent les modes de livraison et les volumes autorisés en fonction du silo.

Les livraisons doivent systématiquement être réalisées en présence d'un représentant du maître d'ouvrage (technicien ou prestataire).

La procédure de contrôle de la livraison doit être clairement définie dans les clauses du contrat. Toute vérification sur la qualité du combustible doit être effectuée avant le déchargement dans le silo.

Les mesures suivantes doivent être réalisées pour chaque livraison :

- taux d'humidité moyen et maximal en % obtenus à partir d'un échantillon prélevé dans la benne du camion. L'échantillon peut se composer de trois à cinq prélèvements judicieusement répartis dans la benne : en partie supérieure, intermédiaire et basse du chargement ;

- double pesage du camion avec son chauffeur : avant et après le déchargement dans le silo.

Le coût de la livraison est ensuite évalué en fonction de l'humidité moyenne relevée et du poids exact du chargement de bois.

Le contrat de fourniture peut être rapporté au volume, au poids ou à la quantité de chaleur effectivement livrée. La solution la plus juste passe par la détermination du poids et de l'humidité de chaque livraison.

Il est conseillé de demander la tenue d'un registre où doivent figurer, au minimum, les données relatives à chaque livraison (date de livraison, poids de la marchandise livrée en tonnes, nature du combustible et origine géographique du bois livré, teneur moyenne en humidité du bois livré).

2.6.5. • Enlèvements des sous-produits de combustion

Si la prise en charge des sous-produits de combustion revient au titulaire, le cahier des charges doit préciser la fréquence et le mode de collecte.

Pour les cendres sous foyer, il est précisé si elles sont collectées par voie sèche ou humide et le volume de stockage :

- bac à cendres de quelques litres ;
- poubelle container de 100 à 300 litres ;
- bennes extérieures de plusieurs mètres cube ;
- autres...

Commentaire

Les chaufferies d'une puissance inférieure à 1000 kW ont généralement une collecte des cendres par voie sèche.

2.7. • Les procédures de contrôle

La qualité du combustible livré doit être contrôlée afin de garantir un approvisionnement conforme au contrat établi entre le maître d'ouvrage et le fournisseur.

Les contrôles définis ci-dessous sont destinés à être mis en œuvre par les personnes en charge de la réception du combustible lors des livraisons d'approvisionnement. En cas de litige (refus de la livraison de combustible), le maître d'ouvrage ou son représentant doit engager une procédure de contrôle réalisée par un laboratoire reconnu compétent.



2.7.1. • Présence de corps étrangers

Le contrôle est réalisé à la réception de la livraison du combustible. Il consiste à repérer visuellement d'éventuels corps étrangers (cartons, papiers, plastiques, métaux, cailloux, pierres, sable).

2.7.2. • Granulométrie

Le contrôle de la granulométrie du combustible consiste à identifier visuellement une éventuelle quantité trop importante de fines ou d'éléments grossiers, telles que des queues de déchetage. En cas de litige récurrent sur la granulométrie du combustible, un contrôle est réalisé par un laboratoire habilité conformément à la norme NF M 03-040. La granulométrie est déterminée par passage à travers des tamis à mailles rondes ou carrées de différentes tailles.

2.7.3. • Humidité

Pour mesurer l'humidité du bois, une méthode simple consiste à déterminer, par pesées successives, la diminution de masse après dessiccation d'un échantillon de combustible. Le séchage est réalisé en utilisant un four à micro-ondes (type grand public) et la pesée par un pèse-lettre.

Le bois est déposé de façon uniforme dans le plateau du four, desséché par périodes de 2 minutes, jusqu'à l'obtention d'un début d'incandescence. Une pesée est réalisée toutes les 2 minutes, l'objectif étant d'avoir une mesure juste avant l'apparition des tâches de pyrolyse et juste après. Le taux d'humidité du combustible est calculé conformément à la formule suivante :

$$H = [m_2 - (m_p - m_{p-1})/2] / (m_2 - m_1) \times 100$$

Avec :

- H : taux d'humidité du combustible en % ;
- m_1 : masse du plateau ;
- m_2 : masse du plateau et de l'échantillon humide ;
- m_p : masse du plateau et de l'échantillon après apparition des tâches de pyrolyse ;
- m_{p-1} : masse du plateau et de l'échantillon lors de la pesée du plateau et de l'échantillon lors de la pesée précédant l'apparition de tâches de pyrolyse.

La mesure est répétée au moins 3 fois pour obtenir une moyenne donnant une meilleure fiabilité à la mesure.

Commentaire

La mesure par four à micro-ondes varie en moyenne de plus ou moins 5% par rapport à la méthode normalisée utilisant une étuve ventilée. En cas de litige récurrent sur l'humidité, il est recommandé de réaliser une mesure en laboratoire suivant cette procédure normalisée.



Si l'échantillon de combustible est laissé trop longtemps dans le four à micro-ondes, un risque d'inflammation existe. La puissance du four est réglée sur 300 W maximum et le contrôleur doit rester à proximité du four.

2.7.4. • Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique d'un combustible bois humide est déterminé à partir de son PCI anhydre et de son taux d'humidité sur brut.

Le PCI anhydre peut être déterminé par calcul, en appliquant la formule approchée suivante :

$$PCI_{\text{anhydre}} = 4,18 \times (94,19 \times C - 0,5501 - 52,14 \times H)$$

Avec :

- PCI_{anhydre} : pouvoir calorifique inférieur du combustible anhydre en kJ/kg ;
- C : pourcentage massique de carbone en % ;
- H : pourcentage massique d'hydrogène en %.



La méthode par calcul implique de connaître les teneurs en carbone et en hydrogène du combustible.

Le PCI anhydre peut aussi être déterminé en utilisant la valeur moyenne du PCI anhydre en fonction de l'essence du combustible (Figure 6). Le contrat d'approvisionnement fixe un PCI anhydre de référence du combustible.

Le PCI du combustible humide est déterminé en appliquant une correction au PCI anhydre liée à l'humidité :

$$PCI_{\text{humidité en \%}} = PCI_{\text{état anhydre}} \times (100 - H_{\text{humidité en \%}}) / 100 - 5,835 \times H_{\text{humidité en \%}}$$



Description et conception des solutions techniques

3



3.1. • Le silo de stockage

Le concepteur du silo de stockage doit prévoir un silo adapté aux futures livraisons sur le site de la chaufferie. Pour cela, il doit :

- connaître les filières d'approvisionnement existantes sur le territoire (le cas échéant en se faisant accompagner par un animateur local de la filière bois-énergie) ;
- définir, en concertation avec le maître d'ouvrage, la solution d'approvisionnement la plus probable.

3.1.1. • Principe

Les deux fonctions essentielles du stockage du bois sont le séchage et l'approvisionnement de la chaufferie. La chaufferie peut être alimentée de deux manières :

- **livrée régulièrement tout du long de l'année** et alimentée en flux tendu au fur et à mesure des besoins de la chaudière : dans ce cas, l'installation dispose d'un silo de stockage de capacité adaptée et comprenant le système de dessilage. On parle de silo actif. Il présente un volume correspondant à une autonomie de la chaufferie de l'ordre de 3 à 10 jours ;
- **associée à une plate-forme de stockage de bois** : dans ce cas, l'installation dispose à proximité immédiate d'un volume de stockage (appelée silo passif) correspondant à une année de consommation (hangar de séchage/stockage associé à la chaufferie), voire à 2 années, si l'on considère le volume nécessaire pour l'année en cours et un volume en cours de séchage pour la saison suivante. Cette plate-forme est généralement associée à un silo de stockage tampon ou à une zone équipée d'un

système de dessilage ; Le transfert du combustible étant assuré par un équipement motorisé disponible sur site (engin de manutention motorisé ou pont à grappin). C'est le cas des opérations montées avec un circuit court d'approvisionnement ou dans des zones aux conditions d'accès difficiles pour les livraisons en période d'hiver (montagne).

3.1.2. • Le séchage

Le séchage du bois est une opération primordiale pour obtenir une combustion propre et améliorer le PCI du bois.

Le plus souvent, le séchage du bois est à la charge du fournisseur. Il est cependant utile de connaître les règles suivantes lorsque le combustible est produit sur le site même de la chaufferie ou pour assurer un complément de séchage de la livraison. Il faut :

- préférer une exposition au sud ;
- aérer le lieu ou le local de stockage ;
- abriter le combustible bois ;
- compter de 4 à 8 mois de stockage respectivement pour les résineux et les feuillus ;
- prévoir un dispositif d'évacuation des eaux même si le combustible n'est pas très humide ;
- pour les sciures, il est vivement conseillé de ne pas dépasser 3 à 4 semaines de stockage en raison du risque de fermentation qui diminue le PCI du bois et qui peut engendrer des incendies.

3.1.3. • Les configurations de stockage

En règle générale, le stockage est assuré par :

- silo pour les faibles puissances (stockage de granulés en vrac et silo maçonné à chargement pneumatique) ;
- container métallique ;
- silo enterré ;
- stockage principal de plain-pied.

La configuration du silo conditionne les modes de livraison.

Commentaire

Un silo aérien impose une livraison en camion souffleur ou en camion à fond mouvant avec échelles carrossables.



Valoriser et optimiser la topographie du terrain est essentiel pour limiter le nombre de transporteurs mécaniques en fonctionnement et de ce fait réduire :

- la fréquence des pannes ;
- la consommation d'énergie électrique requise pour la manutention ;
- l'investissement.

Le silo pour faibles puissances : stockage de granulés en vrac

Pour les installations de faibles puissances, utilisant généralement du granulé de bois comme combustible, le stockage est assuré par des silos de capacité limitée (jusqu'à 15 m³).

Commentaire

Un silo de 15 m³ correspond approximativement à une puissance de chaudière installée de 100 kW et une autonomie recherchée de 10 jours.

Ces silos sont généralement en textile, en métal (mise en œuvre possible à l'extérieur) et plus rarement en plastique ou en béton (cas des silos préfabriqués enterrés).

Commentaire

La mise en œuvre des silos préfabriqués enterrés est contraignante. Ils doivent notamment être parfaitement étanches à l'humidité, être protégés contre une poussée ascensionnelle due au niveau de la nappe phréatique...

Ces silos peuvent être de forme conique, en auge, avec ou sans système de levage.

Commentaire

Il existe également des silos à fond plat. Ces derniers ne peuvent pas être vidés complètement (jusqu'à 15% de combustible restant).

Concernant les silos avec système de levage, sous l'action du mécanisme de levage, la zone inférieure du silo s'abaisse jusqu'au sol en cas de charge intégrale. Pendant le prélèvement, le silo se relève pour permettre la formation du cône nécessaire à l'écoulement.

Dans tous les cas, l'amenée de combustible du silo à la chaudière est réalisée avec un système de vis sans fin entraîné par un moteur à vitesse variable (si la chaudière est contiguë au stockage) ou un système d'aspiration si le silo est déporté d'au moins 3 mètres du stockage (attention dans ce cas à la prise en compte d'éventuels problèmes de nuisances sonores).

Le silo doit être implanté au plus près (15 à 20 mètres) du chemin d'accès du camion de livraison (distance dépendant de la longueur du tuyau de livraison du camion souffleur, suivant le distributeur local). Il doit également être le plus près possible de la chaudière afin d'éviter les surcoûts en alimentation et garder intact les granulés.



Il est primordial de se rapprocher des distributeurs de granulés afin de connaître leurs spécifications et modalités de livraison (longueur du tuyau de livraison, quantités livrables).

Le silo pour faibles puissances : maçonné à chargement pneumatique

Le silo maçonné est adapté à des combustibles de faible granulométrie (granulés ou plaquettes calibrées et dépoussiérées). L'utilisation de combustible d'une masse volumique relativement importante est recommandée.

Le volume du silo est limité (jusqu'à 50 m³) du fait des faibles capacités de livraison par camion souffleur (de 10 à 30 m³).

Commentaire

Un silo de 15 m³ correspond approximativement à une puissance de chaudière installée de 100 kW et une autonomie recherchée de 10 jours.

Ce type de silo permet d'intégrer une chaufferie bois dans des sites n'autorisant pas l'accès aux camions en bordure de silo, à l'aide de tuyaux rigides et flexibles. Le silo est hermétiquement clos, évitant la diffusion des poussières.

Il permet de diminuer les coûts de génie civil en intégrant une partie des travaux de gros œuvre dans l'enveloppe du bâtiment à chauffer ou d'un local proche, réaménagé en stockage.



▲ Figure 11 : Exemple de stockage aérien avec chargement pneumatique

Les conteneurs métalliques

Les conteneurs métalliques sont le plus souvent des bennes de 40 m³ équipées d'un dessilage intégré (extraction par racleurs et vérins). Sur une chaufferie bois de puissance inférieure à 800 kW, ils sont souvent associés par deux ou trois pour assurer des rotations sans rupture d'approvisionnement.

Ces équipements mobiles visent à une mutualisation des moyens de collecte, de transport et de stockage (actif) du combustible.

Cette solution est souvent liée à la proximité d'un site de production (industriel de la transformation du bois ou de chantiers forestiers). En vogue il y a une dizaine d'années, ce système tend à disparaître au profit des silos en durs de plain-pied ou enterrés.

Le silo enterré

Le silo enterré est particulièrement adapté aux chaufferies de petite et moyenne puissance. Leurs capacités volumiques sont limitées, de l'ordre de 50 à 300 m³. La capacité volumique du silo est fonction notamment des volumes de livraison (par tracteur avec benne agricole ou par camion benne) et de l'autonomie souhaitée pour la chaufferie.

Commentaire

Un silo de 300 m³ correspond approximativement à une puissance installée de 2 MW et une autonomie recherchée de 5 jours.



Il est important, pour une telle configuration, d'utiliser les opportunités qu'offrent les locaux existants et la situation du terrain :

- si une parcelle présente un talus descendant, le silo est construit en semi-enterré dans la pente ;
- s'il existe un local disponible pour la chaufferie au sous-sol du bâtiment, la chaufferie et le silo étant situés au même niveau, le convoyage du combustible est simplifié.

Pour une configuration enterrée à l'extérieur, les silos sont fermés par une trappe qui peut être :

- coulissante sur rails vers l'arrière ou le côté (avec un pan ou deux) ;
- basculante vers l'arrière ou le côté (avec un pan ou deux) ;
- escamotable.

Certaines trappes présentent la caractéristique d'être carrossables.

La trappe s'ouvre soit manuellement soit grâce à un système automatisé (vérin hydraulique, treuil électrique, poulie...).

Commentaire

Si la dimension de la trappe est adaptée, le combustible peut être directement déchargé dans le silo par gravité, sans reprise.

Le système d'extraction conditionne la configuration du silo. Les silos d'une capacité inférieure à 100 m³ environ et équipés d'un système d'extraction rotatif (avec pales ressorts ou bras articulés) sont carrés. Les silos d'une capacité supérieure et équipés d'un système d'extraction à échelles de racleurs sont rectangulaires.



▲ Figure 12 : Exemple d'un silo enterré extérieur avec trappes coulissantes



Le silo de plain-pied

Le silo de plain-pied est particulièrement adapté aux chaufferies de moyenne et forte puissance. Ses capacités volumiques sont « illimitées » (supérieures à 300 m³).

Le silo est au niveau du sol extérieur. Cette solution est la réponse à des impératifs techniques (impossibilité de créer un silo enterré) ou des contraintes financières (impact du coût du génie civil d'un silo enterré sur la rentabilité du projet).

Le silo de plain-pied est adapté à deux types de chaufferies :

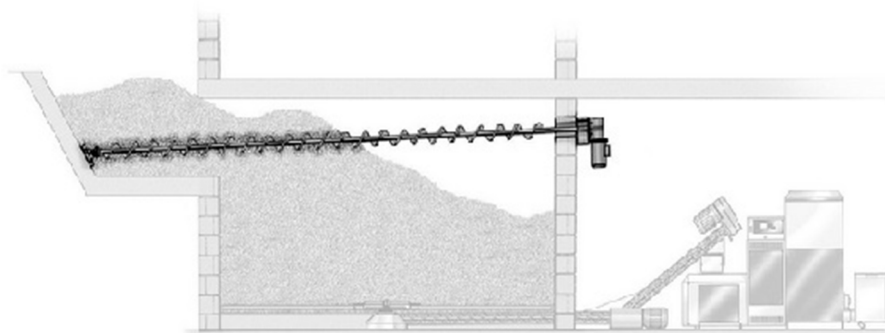
- pour les fortes puissances, ce choix conditionne l'optimum technique (autonomie suffisante) et économique de l'installation. Le combustible est transféré à l'aide d'un chargeur (intervention d'un agent d'exploitation) ou d'un pont à grappin (automatisé) ;
- pour les petites et moyennes puissances, il répond à des contraintes d'approvisionnement spécifiques liées au climat (gel et enneigement prolongé des routes) ou à des modes d'approvisionnement en circuit court avec stockage d'une partie de la consommation annuelle de combustible sur le site de la chaufferie. Cette configuration est très répandue en Autriche. Le chargeur est dans ce cas le mode de manutention qui s'impose.

3.1.4. • Alimentation du silo de stockage

Par gravité

Pour une configuration enterrée à l'extérieur et si les dimensions de la trappe de déchargement sont suffisantes, le combustible peut être déchargé dans le silo par simple gravité, sans reprise.

Pour une configuration enterrée à l'intérieur (en sous-sol de bâtiment par exemple), la livraison du bois est réalisée par l'intermédiaire d'une trappe construite à l'extérieur du bâtiment. Une trémie intermédiaire équipée d'un système de répartiteurs (vis sans fin horizontales) permet de transférer et de répartir le combustible dans le silo enterré.



▲ Figure 13 : Exemple d'un silo enterré intérieur avec vis de remplissage et/ou de répartition du combustible dans le silo

Commentaire

Les systèmes de trémie et transfert par vis sans fin entraînent un allongement de la durée de livraison et une possible perte de volume utile du silo.

Avec vis de remplissage verticale

Le principe consiste à aménager un dispositif de livraison extérieur acheminant le bois vers le centre du silo de plain-pied : une trémie intermédiaire, fixe ou mobile, comprend en son fond une vis sans fin horizontale reliée à une vis verticale, laquelle est équipée d'une soufflerie afin que le bois déchiqueté soit propulsé à l'horizontale vers la partie haute du silo.

Ce système offre la possibilité à un silo de plain-pied de disposer d'un volume utile plus important (près de 80% de taux de remplissage, hors volumes des angles morts).

Par tapis transporteur

Ce type de silo est surtout rencontré chez les agriculteurs et dans les entreprises du bois. Le bois est placé sur un tapis transporteur (horizontal ou incliné) via un chargeur ou un camion à déchargement contrôlé (ancien épandeur adapté, benne basculante), pour être acheminé progressivement vers le silo de stockage, qui peut être enterré ou de plain-pied.

Par camion souffleur

Comme pour une installation fonctionnant aux granulés de bois, la livraison s'opère en connectant la soufflerie à un conduit métallique fixé au silo, qui doit être parfaitement hermétique. Le bois est propulsé dans le silo en partie supérieure, lui conférant un taux de remplissage important. L'air de convoyage est évacué par un manchon de décompression muni d'une manche filtrante ou est aspiré par le camion.

Le soufflage des granulés doit se faire à une pression de soufflage minimale permettant de conserver la qualité des granulés. Cette opération permet d'éviter :

- l'effritement du combustible ;
- une mauvaise qualité et combustion du bois (risque d'encrassement).

La charge totale du véhicule peut aller jusqu'à 32 tonnes. La distance maximale entre le camion et le silo est de 20 mètres linéaires (sauf cas particulier à valider avec le livreur). En effet, au-delà, le granulé risque d'être endommagé lors du soufflage et la livraison peut même devenir strictement impossible.

A titre indicatif, les temps de livraison sont :

- de 10 min pour un bennage gravitaire direct ;



- de 45 min à 1 h pour un bannage gravitaire par trémie intermédiaire ;
- de 45 min à 1 h par camion souffleur (selon la longueur des tuyaux à installer pour la livraison et selon la facilité d'accès au silo).



Plus la durée d'immobilisation du camion sera importante, plus le prix du combustible sera élevé. Il faut donc choisir la solution la plus rapide en fonction des possibilités du projet et du volume à livrer.

3.2. • L'alimentation : le transfert silo-foyer

Ce chapitre décrit les différents dispositifs de transfert, en fournissant leurs limites (angle, pente, longueur...) et les sécurités associées.

3.2.1. • Dessilage – Extraction du combustible

Le système de dessilage est installé en partie basse du silo de stockage. Il permet l'extraction du combustible vers le système de convoyage. Il existe deux principaux types d'extracteurs de silo :

- extraction à base d'un système à balayage rotatif ;
- extraction à partir d'échelles racleuses.



▲ Figure 14 : Exemple de systèmes de dessilage à balayage rotatif (à gauche) et à échelles racleuses (à droite)

La conception des silos détermine en partie le choix du système de dessilage : les silos inférieurs à 100 m^3 sont carrés et équipés de pales rotatives, alors que les silos de plus grande capacité sont équipés d'échelles de racleurs dont l'emprise au sol nécessite la conception d'un silo rectangulaire.

Le système de dessilage est également fonction de la qualité du combustible utilisé (taux d'humidité et granulométrie). Le tableau (Figure 15) recommande le type d'extracteur en fonction du combustible utilisé.

Humidité	Type d'extracteur	
	Granulométrie faible	Granulométrie forte
Faible	Balayage rotatif	Echelles racleuses
Moyenne	Balayage rotatif	Echelles racleuses
Forte	Echelles racleuses	Echelles racleuses

▲ Figure 15 : Type d'extracteur recommandé selon la qualité du combustible utilisé

Le balayage rotatif

Il existe plusieurs systèmes basés sur le même principe :

- vis d'Archimède et bras de fraisage à mouvement pendulaire ou circulaire :

Le mouvement de la vis dépend uniquement de la forme de la section du silo. Le mouvement est circulaire dans les silos de section carrée, circulaire ou octogonale et pendulaire dans tous les autres cas. Ce système est relativement sensible à la formations de ponts, à l'arrivée de gros morceaux de bois voire de corps étrangers. Il convient particulièrement aux combustibles comme les plaquettes sèches ou les copeaux ;

- vis d'Archimède montée sur cadran à la base et décrivant un cône d'ouverture variable :

L'extraction conique peut être envisagée pour des diamètres utiles de silo de 1,5 à 5 mètres, dans des silos à petites sections circulaires, octogonales ou carrées (la vis d'extraction travaille selon un angle que l'on peut faire varier). Ce système convient également pour des plaquettes sèches et des copeaux. Le risque de formation de pont est fortement réduit dans ce système de par la position angulaire de la vis ;

- lames souples en rotation au fond du silo avec vis d'Archimède radiale de reprise en-dessous :

On peut rencontrer ce système d'extraction dans tous les types de silo. Son inconvénient majeur est le faible rapport entre le volume brassé et le volume utile du silo. Certains fabricants lui associent un dévôteur constitué d'une vis d'Archimède à développement conique mais refoulant vers le haut. Les combustibles les plus adaptés à cette technologie sont les plaquettes sèches et les copeaux (et éventuellement les sciures).



Ce dernier système impose une qualité du combustible stricte : granulométrie régulière et limitée pour éviter les blocages de la vis. L'humidité joue également un rôle important. Un combustible trop humide se tasse et augmente les frottements qui peuvent entraîner un blocage de la vis.

L'extracteur rotatif étant installé au centre d'un silo carré, le bois situé dans les angles n'est pas extrait en totalité, ce qui constitue des volumes morts. La création d'un silo rond ou la mise en œuvre d'un plancher incliné sous le fond du dessileur est trop onéreux en regard du faible gain de volume perdu.

Les échelles racleuses

Il s'agit de profils d'extraction disposés sur le fond du silo. Les échelles racleuses sont animées d'un mouvement de va-et-vient à entraînement hydraulique. Ce type d'extraction présente plusieurs intérêts :

- absence d'entraînement mécanique dans le combustible ;
- insensibilité à la taille du combustible et à son humidité ;
- rare formation de pont à l'intérieur du silo.

Commentaire

Compte tenu du coût, il est recommandé de limiter le nombre d'échelles racleuses. Ce type d'extraction est particulièrement adapté aux silos longs et étroits.

Les fonds racleurs sont activés par des vérins et une centrale hydraulique dont la puissance permet d'actionner les échelles en fond de silo lorsque ce dernier est plein de bois, même sur des hauteurs importantes (de 4 à 5 m).

Les vérins hydrauliques doivent travailler en traction et non en compression pour éviter tous risques de déformation. Ils doivent donc être positionnés de façon à ramener le combustible vers eux.

Les ancrages des vérins hydrauliques doivent être rendus solidaires de l'armature de base du silo. Il ne doit y avoir qu'un seul et unique vérin par échelle. Il est recommandé d'alterner les mouvements relatifs des échelles.

Commentaire

Suivant le combustible utilisé, le système de transfert en sortie d'échelles peut être une vis ou un tapis.

Cas spécifique du granulé

Le dessilage des granulés de bois s'effectue :

- par une vis sans fin logée au fond d'un canal aux pans inclinés ou en cône (45° minimum) permettant l'écoulement par gravité

des granulés jusqu'à la vis qui les achemine ensuite vers le foyer ;

- par aspiration du granulé.

Commentaire

Pour un vidage complet du silo, les pans inclinés sont installés dans le sens de la plus grande longueur.

3.2.2. • Les différents modes de transfert

La nature du combustible, le type de foyer et le système d'extraction déterminent en partie le choix du mode de transfert.



Le convoyage vers la chaudière doit être le plus court possible et son inclinaison ne pas dépasser 45°.

Il existe deux grandes familles de systèmes de transport :

- par convoyeur de reprise ;
- par vis d'Archimède.

Les systèmes par gravité et les systèmes pneumatiques sont moins fréquents.



▲ Figure 16 : Système de transfert par convoyeur de reprise (à gauche) et vis d'Archimède (à droite)

Par convoyeur de reprise

Ce système ne convient qu'aux foyers de type trémie. Il peut être utilisé avec tout type de combustible. Il est constitué :

- de bandes de caoutchouc lisses ;
- de tapis caoutchouc à bavettes ou nervures ;
- de racleurs à chaînes et sabots ;
- d'éléments métalliques articulés à nervures ;
- d'élevateurs à godets.



Des morceaux de bois peuvent s'arc-bouter sur des aspérités des convoyeurs et de leurs rives aux risques de provoquer des dégâts. Il convient donc :

- d'éliminer le maximum d'aspérités sur les rives des convoyeurs et d'utiliser des vis ou des boulons à têtes bombées ou fraisées ;
- d'assurer l'assemblage soit bout à bout soit à clin de telle façon que le bord apparent des tôles soit orienté vers la sortie du transporteur ;
- de remplacer les rives métalliques par des bavettes continues en caoutchouc armé.

Si une partie du parcours du convoyeur est à l'extérieur, il faut installer un capotage amovible pour mettre le combustible à l'abri des intempéries.

Si la régulation du taux de charge agit sur le débit du combustible de la chaudière, il est nécessaire d'installer un dispositif particulier destiné à éviter qu'une réduction de débit n'engendre des bourrages et des chutes de bois au cours du transfert. Ce dispositif se compose :

- d'un sas intermédiaire, placé entre le silo et la chaudière, équipé de capteurs de niveau haut et bas qui interdisent ou autorisent l'extraction de combustible ;
- de couvercles amovibles recouvrant le tapis de transfert.

La largeur du convoyeur doit être suffisante pour éviter des bourrages trop fréquents avec les déchets de bois hors norme. Il est recommandé une largeur minimale de 400 mm.

Il est nécessaire de connaître la pente maximale d'acheminement jusqu'au foyer. Elle dépend du combustible et du type de convoyeur mais aussi de la distance entre le silo et la chaudière.

Le tableau de la (Figure 17) indique le choix du type de convoyeur de reprise en fonction du combustible.

Type de convoyeur	Combustible	Pente maximale d'acheminement
Bandes caoutchouc lisses	Tous types de déchets sauf briquettes comprimées de section circulaire	40%
Bandes à nervures – convoyeur à tasseaux avec une hauteur des reliefs < 50 mm	Tous types de déchets sauf briquettes comprimées de section circulaire	60%
Bandes à nervures – convoyeur à tasseaux avec une hauteur des reliefs > 50 mm	Taquets, plaquettes papières et briquettes de section circulaire	60%
Transporteurs à palettes métalliques cloisonnées	Sciures vertes ou écorces de feuillus Tous les autres types de combustibles	> 60%, jusqu'à 100 à 120%
Elévateurs à godets	Tous types de déchets	Verticale

▲ Figure 17 : Choix du type de convoyeur de reprise en fonction du type de combustible

Commentaire

Un déchet humide, du fait d'un coefficient de frottement supérieur à celui d'un déchet sec, s'éboule moins facilement et autorise donc des pentes supérieures.



Le convoyeur est équipé d'un carénage et de trappes de visites pour éviter les risques d'accidents et les émissions de poussières.

Par vis d'Archimède

Les combustibles convoyés par vis d'Archimède doivent être secs et de faible ou moyenne granulométrie.



L'utilisation des sciures vertes est à proscrire sous peine d'occasionner de graves dommages et même la rupture de la vis.

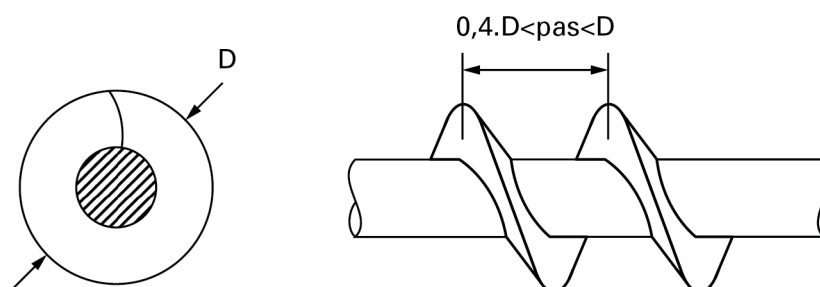
Une trappe de débouillage doit équiper chaque changement de direction du transport du bois.

Il est recommandé d'installer une écluse rotative de dosage sur l'alimentation en bois du foyer.

Plusieurs procédés existent (languettes souples, clapet battant de surpression...). Les languettes souples sont préférables car elles ne laissent subsister ni aspérités, ni évidements susceptibles d'entraver la bonne circulation du combustible.

Pour limiter les risques de bourrage et de panne pouvant entraîner de graves dommages :

- adopter un diamètre de tube et un pas de vis (distance entre deux spires) suffisants pour le passage des plus gros morceaux. Le diamètre recommandé varie entre 175 et 200 mm et le pas entre 0,4 et 1 fois le diamètre (Figure 18) ;
- ou utiliser des tubes de section carrée 150 x 150 mm permettant d'écarter les déchets trop grands dans les angles morts.



▲ Figure 18 : Dimensionnement de la vis d'Archimède



Le système par vis d'Archimède n'accepte que les combustibles de granulométrie parfaitement homogène. Les vis sans fin sont souvent source de très nombreux incidents dans les installations qui reçoivent, même ponctuellement, des produits hétérogènes comprenant des queues de déchiquetage ou des corps étrangers (cailloux et ferrailles notamment).

Cas spécifique du granulé

Le convoyage peut être réalisé à l'aide d'un système d'aspiration (pneumatique) qui reprend le combustible dans le silo et le transfère vers une petite trémie tampon, située juste en amont de l'introduction dans le foyer.

3.2.3. • Système d'introduction dans le foyer

L'introduction du combustible (sur un plan horizontal uniquement) dans le foyer est automatisée : l'apport en combustible est réalisé selon les besoins de l'installation. Le système est fonction notamment du type de système de convoyage, de la qualité du combustible et de la puissance de la chaudière. Il peut se présenter sous la forme :

- d'une vis d'Archimède adaptée aux installations de faibles et moyennes puissances (< à 800 kW) et aux combustibles homogènes et calibrés. Elle est généralement associée à un système de convoyage par vis d'Archimède et un brûleur de type creuset (ou volcan) ;
- d'un piston poussoir (piston injecteur coulissant dans un canal étanche) adapté aux installations de moyennes et fortes puissances (> à 800 kW) et aux combustibles hétérogènes et humides. Il est généralement associé à un système de convoyage par reprise et à un foyer universel à grilles mobiles inclinées. L'inclinaison du piston est choisie avec un angle descendant pour éviter une remontée du feu au niveau du système d'approvisionnement du combustible. Le piston peut être muni d'un couteau et d'un contre-couteau pour sectionner les éléments occasionnels de grande longueur.



Une coupure coupe-feu, réalisée par un clapet, une écluse rotative ou un système à coulisse ou guillotine, est disposée sur le système d'introduction du combustible dans la chaudière.

Un dispositif de sécurité incendie est prévu dans la colonne de la trémie. Un système d'extinction de feu par aspersion se déclenche

lorsque la température est trop élevée, ce système de sprinkler arrose la trémie en cas de feu. Il est installé en amont du système anti-remontée de feu, à l'extrémité du système de convoyage.

Il peut être réalisé :

- par buse directement raccordée sur le réseau d'eau ;
- par bidon d'eau (attention à ce que le bidon soit toujours plein).

3.3. • Le foyer

Le foyer est la zone où se déroule la combustion du bois. Il peut s'agir :

- d'un foyer intérieur intégré à une chambre de combustion suivi d'un échangeur, le tout constituant une chaudière ;
- d'un avant foyer : il est placé immédiatement en amont de la chaudière, laquelle possède donc sa propre chambre de combustion où l'on conserve la possibilité d'installer un brûleur classique (fioul ou gaz) ;
- d'un foyer extérieur : les gaz de combustion sont alors acheminés par un conduit vers un échangeur physiquement distinct comportant ou non une chambre de combustion.

Commentaire

Le foyer intérieur intégré à la chaudière est le système actuellement le plus répandu.

Il existe de nombreuses configurations de foyers :

- le brûleur à creuset (ou à volcan) : le combustible amené horizontalement par une vis d'Archimède débouche à la base d'un auget en forme de trémie où il brûle en s'écoulant vers le haut sous l'effet de l'air injecté latéralement. Ce brûleur peut être placé en foyer intérieur ou en foyer extérieur. Il est réservé à des combustibles secs et homogènes destinés principalement aux petites et moyennes puissances (inférieures à 500 kW) ;
- le brûleur à pelle : il est proche du brûleur à creuset de part son mode d'acheminement du combustible mais diffère par la forme en pelle de la zone de combustion où l'écoulement du combustible devient oblique. De faible encombrement, ce type de foyer s'adapte bien pour de petites chaudières ;
- le foyer cyclone : un système pneumatique insuffle les morceaux de bois dans la chambre de combustion où ils brûlent en tombant dans le feu. Cette technique n'est envisageable qu'avec un combustible d'une granulométrie très fine (copeaux et sciure) ;



- le foyer universel : il est capable, en théorie, de brûler tous les types de déchets de bois. Il est à grille lorsque le volume de combustion est formé de barreaux métalliques en fonte réfractaire (ou éventuellement de tubes refroidis) sur lesquels brûle le combustible grâce à l'air admis sous les barreaux (eux mêmes parfois perforés). On distingue :
 - les grilles fixes préconisées pour des combustibles secs ;
 - les grilles mobiles inclinées (pour des chaudières de moyenne et forte puissance) ou planes (pour des chaudières de forte puissance).



La granulométrie et l'humidité du bois sont les deux paramètres essentiels dans le choix du foyer.

Commentaire

En brûlant, un combustible bois sec produit beaucoup plus de chaleur qu'un combustible bois humide. Dans les foyers destinés à brûler du bois humide, les parois sont garnies de réfractaire pour augmenter la température de la chambre de combustion.

Dans le cas d'un avant foyer ou d'un foyer extérieur, la combustion du bois sec nécessite la mise en place d'un système de refroidissement des parois, par une circulation d'eau sur l'enveloppe du foyer par exemple.

Un tel refroidissement est inutile pour un foyer intérieur car il peut dissiper une partie de la chaleur issue de la combustion par conduction avec la partie échangeur de la chaudière.

Le tableau (Figure 19) donne les indications de choix du foyer en fonction du combustible.

Humidité	Granulométrie	
	Faible	Forte
Faible	Foyer cyclone Brûleur à creuset Foyer extérieur à parois refroidies Foyer intérieur à parois de chambre de combustion non revêtues de réfractaire	Foyer universel
Moyenne	Brûleur à creuset Foyer extérieur à parois non refroidies Foyer intérieur à parois de chambre de combustion revêtues de réfractaire	Foyer universel à parois entièrement garnies de réfractaire
Forte	Foyer universel à parois entièrement garnies de réfractaire et dispositif de pré-séchage	Foyer universel à parois entièrement garnies de réfractaire et dispositif de pré-séchage

▲ Figure 19 : Choix du type de foyer en fonction du combustible utilisé

Commentaire

L'investissement est d'autant plus important que le foyer est équipé en matériau réfractaire.



3.4. • La chaudière

La chaudière est le lieu où se déroule l'échange thermique entre les fumées de la combustion et l'eau du réseau hydraulique. Elle peut être :

- à tubes de fumée : les fumées circulent dans les tubes immergés dans l'eau du réseau hydraulique. Pour augmenter l'échange, les tubes effectuent souvent un triple parcours dans la chaudière. La surface d'échange doit être maximale ;
- à tubes d'eau : c'est l'eau du réseau de chauffage qui circule dans les tubes. Ce système est généralement utilisé pour des chaudières de fortes puissances. Il offre d'excellents rendements et simplifie l'opération de ramonage de l'échangeur de la chaudière. De surcroît, il permet d'éviter la création de zones d'eau stagnante favorisant la surchauffe dans la chaudière.

La chaleur dégagée lors de la combustion est transférée à l'eau du système de chauffage comme dans une chaudière traditionnelle.

Chaudières à poussée inférieure

Ce type de chaudière est adapté à un combustible relativement sec (25 à 40% de teneur en eau, en moyenne) et bien calibré. Les chaudières à poussée inférieure sont fréquemment utilisées jusqu'à des puissances de 500 kW. Le combustible est poussé de bas en haut dans un réceptacle (cornue). C'est à ce niveau qu'est injecté l'air primaire permettant la première combustion et la gazéification du bois. L'injection de l'air secondaire s'effectue avant l'admission des gaz dans la chambre de post combustion.

Chaudières à grilles

Ce type de chaudière est adapté à des combustibles grossiers et relativement humides (jusqu'à 60% de teneur en eau). Les chaudières à grilles sont fréquemment utilisées pour des puissances supérieures à 500 kW. Le combustible est amené par une vis sans fin ou un poussoir dans la chambre de combustion. Un système de grilles mobiles permet de faire avancer le bois par glissement des grilles les unes sur les autres. Il existe également des grilles fixes, le combustible est alors poussé par l'arrivée du bois. L'injection d'air primaire s'effectue sous la grille de manière à assurer un pré-séchage et une gazéification du bois. L'air secondaire est diffusé dans la chambre de post combustion

3.5. • Le décendrage

Dans une chaufferie bois, on distingue deux types de cendres :

- les cendres provenant de la combustion du bois collectées sous foyer qui représentent la partie la plus importante en quantité ;



- les particules issues de la filtration des fumées également appelées cendres volantes. Elles concentrent les éléments traces métalliques considérés comme polluants.

Ces deux types de cendres sont collectés séparément. Les cendres volantes sont évacuées en centre d'enfouissement technique (centre de classe 1) et aucune valorisation ne peut être envisagée. Les cendres sous foyer sont récupérées et éventuellement valorisées. Pour plus de détails se référer au chapitre 11 (cf. 11).

Commentaire

Pour les chaudières de faible puissance, les cendres issues de la filtration par multicyclone composées de particules plus importantes en taille peuvent être mélangées avec les cendres sous foyer et donc évacuées par le même système. Pour les installations comportant un filtre à manches ou un électrofiltre, les systèmes d'extraction des cendres sous foyer et celles volantes sont distinctes.

Les cendres sont évacuées par un système de décendrage automatique (vis transporteuse ou convoyeurs à chaînes en combinaison avec des conteneurs ou bennes à cendres) ou manuel (bac à cendres situé directement sous le foyer). Le choix du système de décendrage se fait notamment en regard du type de foyer de la chaudière. On donne dans le tableau (Figure 20) des indications de choix du système d'extraction des cendres.

Type de foyer	Décendrage manuel	Décendrage automatique
Brûleurs à creuset, cyclones	x	
Foyers à grilles fixes	x	x
Foyers à grilles mobiles		x

▲ Figure 20 : Choix du système de décendrage en fonction du type de foyer

Pour les installations de moins de 200 kW, le décendrage peut être manuel. Au delà, un décendrage automatique est fortement recommandé, en particulier si le foyer le permet. Cette technique est en effet réellement efficace pour les foyers à grilles mobiles qui cassent les croûtes formées par les mâchefer.



La teneur et la nature des cendres ont une importance dans le choix de la technologie de combustion.

Un taux de minéraux élevé provoque une formation importante de mâchefer qui oblige à utiliser des foyers à grilles mobiles ou des systèmes de recyclage des gaz de combustion pour appauvrir l'air comburant en oxygène et ainsi diminuer la température de foyer (et, par conséquent, limiter la production de mâchefer).



3.5.1. • Cas d'un système de décrochage manuel

Cette technique requiert une présence humaine lors de l'intervention. L'opérateur utilise des engins de levage conçus pour transporter le bac situé directement sous le foyer.

L'utilisation d'un aspirateur de décrochage est recommandée pour le nettoyage complet du foyer (ventilateur à haute pression fixe et résistant à la chaleur ou aspirateur à poussières industriel mobile muni d'un dispositif de dépoussiérage des gaz de combustion).



Le tuyau d'aspiration doit être en matériau résistant à la chaleur. Toutes interventions nécessitent le port de gants thermofuges.

3.5.2. • Cas d'un système de décrochage automatique

A intervalle de temps défini, le système de décrochage se met en fonctionnement automatiquement. Il évacue les suies de nettoyage de l'échangeur et de dépoussiérage des fumées (le cas échéant) ainsi que les cendres de combustion et les acheminent dans un bac à cendres.

Les cendres peuvent se présenter sous deux aspects, sec ou humide. La quantité produite varie d'une chaufferie à l'autre et est fonction notamment :

- de la quantité et des caractéristiques (humidité notamment) du combustible consommé ;
- de la teneur en cendres du combustible utilisé ;
- du mode de décrochage utilisé, par voie sèche ou humide.

Commentaire

On donne, à titre d'exemple, le volume de cendres produit pour 1000 tonnes de bois consommé (pour un taux d'humidité de 40%) :

- par voie sèche : 11 m³ soit 6 tonnes (500 à 600 kg/m³) ;
- par voie humide : 8,4 m³ soit 8,4 tonnes (1000 kg/m³).

Cas des cendres sèches

Le décrochage par voie sèche est utilisé principalement dans les chaufferies de faible et moyenne puissance (inférieure à 1 MW).

L'extraction des poussières dans les échangeurs thermiques est réalisée par une vis sans fin dans les turbulateurs.

Le décrochage du foyer peut être réalisé par pale rotative et grille de décrochage ou par chaîne à godets.



Le convoyage des cendres est assuré par une vis de décendrage, placée sous le foyer ou à son extrémité. Les cendres récupérées sont acheminées vers le bac à cendres.

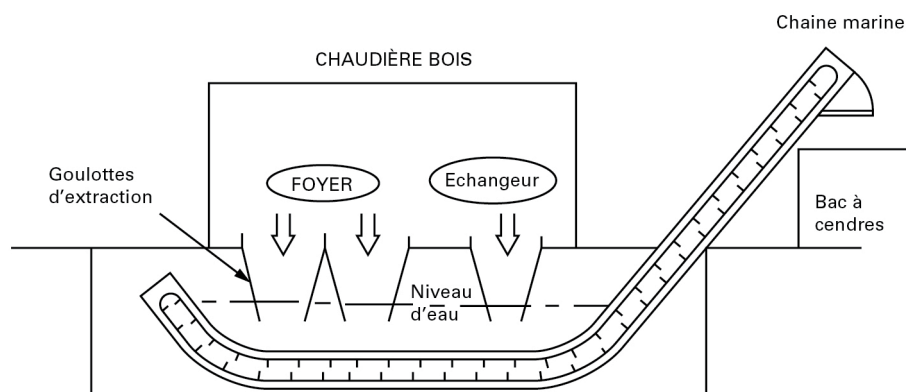
Cas des cendres humides

Le décendrage par voie humide est utilisé principalement dans les chaufferies de forte puissance (supérieure à 1 MW) et fonctionnant toute l'année (process).

Les cendres récupérées sont humidifiées dans le système de convoyage : arrivées en bout de grille, elles tombent dans un lit d'eau, puis sont reprises par un convoyeur à chaînes vers le bac à cendres.

Commentaire

Ce dispositif présente l'avantage d'éteindre les cendres encore rouges et d'éviter que les poussières très fines ne s'envolent.



▲ Figure 21 : Système de décendrage automatique par immersion dans l'eau du convoyeur

Le système de stockage

Le stockage des cendres doit permettre avant tout d'éviter l'humidification des cendres et leur prise en masse. Plusieurs solutions de stockage existent. Le type (sacs « big bags », bacs, bennes) et la taille des systèmes de stockage (de 10 litres jusqu'à 10 m³) sont fonction :

- de la consommation de bois à la puissance nominale de la chaudière ;
- de la teneur en cendres du combustible consommé ;
- de la fréquence de décendrage souhaitée.

On donne (Figure 22) des exemples de systèmes de stockage des cendres sous foyer selon la puissance installée.



▲ Figure 22 : Bac à cendres sous foyer (de gauche à droite : 8 m³, 300 litres, 20 litres)

Commentaire

Pour plus d'informations, se reporter au chapitre 11.6 (cf. 11.6) « Le stockage des cendres ».

3.6. • L'évacuation des produits de combustion

3.6.1. • Typologie des conduits de fumée

L'ouvrage de fumisterie sert à évacuer les produits de combustion (fumées) provenant d'une ou des chaudières au bois. Les règles de conception, d'installation et de maintenance sont pour l'essentiel traitées par les normes NF DTU 24.1 et NF EN 15287-1.

Les deux parties principales de l'ouvrage sont le conduit de raccordement allant de la buse de la chaudière jusqu'à la jonction avec la seconde partie constituée par le conduit de fumée. Dans le cas de plusieurs chaudières, les conduits de raccordement sont raccordés sur l'unique conduit de fumée par l'intermédiaire d'un carneau.

La norme NF DTU 24.1 P1 liste la nature et le type de matériaux de conduits de fumée et de tubages utilisables et les normes auxquelles ils doivent être conformes.

D'autres matériaux peuvent être utilisés s'ils font l'objet d'un Avis Technique ou d'un Document Technique d'Application.

3.6.2. • Techniques pour le traitement des fumées

Pour les chaufferies de puissance thermique inférieure à 2 MW, il n'existe pas de réglementation fixant la valeur limite de rejet de poussières. Il est recommandé de retenir la valeur limite réglementaire (arrêté du 25 juillet 1997 modifié) applicable aux chaufferies de puissance thermique comprise entre 2 et 4 MW (cf. 10.7).



Les trois techniques les plus couramment utilisées pour le traitement des fumées dans les chaufferies bois sont (cf. 10.8) :

- le multicyclone ;
- le filtre à manches ;
- l'électrofiltre.

3.6.3. • Traitement acoustique

L'ensemble des équipements de la chaufferie génère des émissions sonores importantes qui imposent un traitement acoustique au minimum pour :

- les ventilations hautes et basses par la mise en place de pièges acoustiques (baffles) dans les veines d'air. L'intégrité de la section de la bouche de ventilation doit être conservée ;
- les extracteurs (ventilateurs) notamment sur les circuits de fumée.

Les ventilateurs génèrent trois types d'émissions sonores :

- les bruits transmis par l'enveloppe, rayonnés dans la chaufferie puis à l'extérieur. Ils sont généralement traités par la mise en place d'un capotage insonorisant ou le traitement acoustique des ventilations hautes et basses de la chaufferie ;
- les bruits à l'aspiration du ventilateur. Ces bruits n'ont généralement pas besoin d'être traités puisque l'aspiration est raccordée à la chaudière ;
- les bruits au refoulement du ventilateur véhiculés par la cheminée et rayonnés à l'extérieur. Ils doivent être traités par la mise en place de silencieux.

Si un traitement acoustique n'est pas installé initialement sur le circuit de fumée, il est conseillé de prévoir son implantation ultérieure par une réservation de 1,5 m x 1,5 m sur une longueur de 3 m. Cette réservation peut être faite sur un plan horizontal ou sur un plan vertical.

Le dimensionnement de la chaufferie bois

4



4.1. • L'importance du dimensionnement

La puissance installée est l'un des paramètres essentiels qui conditionne la réussite d'un projet de chaufferie au bois. Un mauvais dimensionnement du générateur à bois peut entraîner :

- une surconsommation, d'où des coûts d'exploitation élevés ;
- une dégradation rapide des mécanismes de régulation ;
- des émissions polluantes importantes.

C'est pourquoi il est primordial de respecter les règles de dimensionnement présentées par la suite et notamment d'éviter de surdimensionner la chaudière bois.

Une chaudière bois ne doit pas être dimensionnée de la même façon qu'une chaudière utilisant un autre combustible comme le fioul ou le gaz.

Quel que soit le combustible brûlé, une chaudière a un rendement de combustion dégradé lorsqu'elle fonctionne à une allure réduite (inférieure à son régime nominal). Cette dégradation de la combustion est particulièrement sensible pour le bois du fait de l'inertie importante de ce type d'installation.

Une chaudière qui est surdimensionnée ne fonctionne jamais à sa puissance nominale et augmente considérablement le nombre de phases de mise en marche et d'arrêt. Un tel fonctionnement sollicite beaucoup les mécanismes de régulation et accélère leur usure. D'autre part, chaque étape de mise en marche ou d'arrêt augmente les pertes thermiques par chaleur sensible des fumées et par imbrûlés gazeux ainsi que les émissions polluantes.



Il est donc recommandé de :

- conserver l'ancien générateur s'il s'agit d'un projet de substitution d'une autre énergie par le bois ;
- choisir une installation bi-énergie (notamment pour des puissances supérieures à 200 kW) associant le gaz ou le fuel à l'énergie bois. La chaudière bois peut fonctionner seule ou simultanément avec le système d'appoint en cas de forts besoins de chauffage.

4.2. • Le choix de la solution technique : mono-énergie ou en bi-énergie

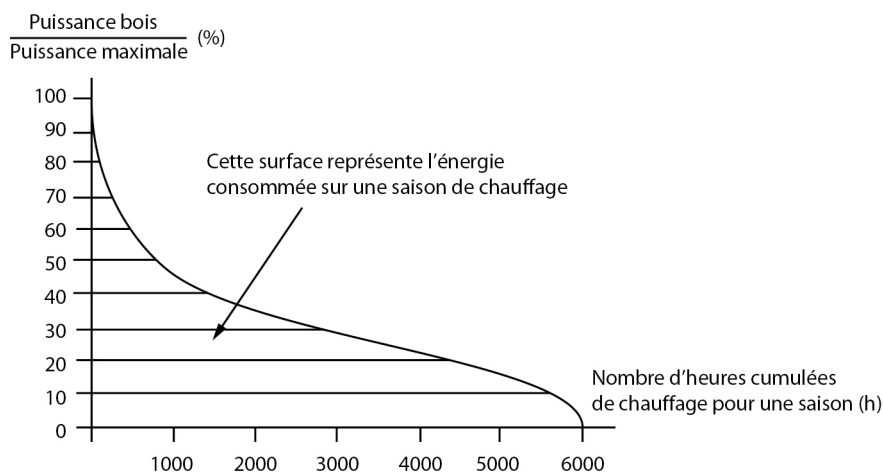
L'ensemble des besoins du site peut être couvert :

- uniquement par le bois : on parle d'installation mono-énergie ;
- par le bois et une chaudière en appoint utilisant de préférence un combustible fossile : on parle d'installation bi-énergie.

Si l'on veut couvrir la totalité des besoins d'énergie d'un site, le dimensionnement de la chaufferie doit prendre en compte les jours exceptionnellement froids. La puissance installée doit correspondre à l'appel maximal de puissance pour la température extérieure de base du site considéré.

La puissance installée correspond donc à la puissance nécessaire pour satisfaire, en régime stable, les besoins thermiques correspondant à la température extérieure de base du lieu. Celle-ci varie sur le territoire et n'est atteinte en hiver que pendant quelques jours. Elle correspond aux besoins de chauffage maximum. Cette puissance n'est donc utilisée dans sa totalité que pendant une durée très faible.

La (Figure 23) présente la courbe monotone des besoins thermiques au cours d'une saison de chauffe.



▲ Figure 23 : Courbe monotone des besoins annuels de chauffage

4.2.1. • Une installation mono-énergie pour des puissances inférieures à 200 kW

Une installation mono-énergie est une installation comprenant une à plusieurs chaudières utilisant un seul et même combustible.

L'ensemble des besoins du site peut être couvert par le bois. La puissance de la chaudière équivaut dans ce cas à 100% de la puissance maximale.

Cette puissance élevée implique un fonctionnement fréquent de la chaudière au ralenti occasionnant une combustion incomplète et une dégradation des performances.



Il est fortement recommandé pour une installation mono-énergie la mise en place d'un ballon d'hydroaccumulation d'une capacité suffisante.

Dans le cas d'une installation mono-énergie de type granulés, il peut être préconisé d'installer deux chaudières à granulés dont les puissances se répartissent ainsi :

- 1^{ère} chaudière : puissance égale aux deux tiers (2/3) de la puissance maximale ;
- 2^{ème} chaudière : puissance égale au tiers (1/3) de la puissance maximale.

Cette solution permet :

- une meilleure utilisation de la puissance installée : la chaudière utilisée fonctionne un maximum de temps à puissance nominale conduisant ainsi à de meilleures performances énergétiques et environnementales ;
- de rassurer le maître d'ouvrage. Il dispose d'un secours : si l'une des chaudières est à l'arrêt (pour cause d'entretien ou de panne), la chaudière en fonctionnement est capable de couvrir, au moins en partie, les besoins du site.



Cette solution conduit à un important surcoût d'investissement. La rentabilité économique du projet est fortement impactée.

4.2.2. • Une installation bi-énergie pour des puissances supérieures à 200 kW

Une installation bi-énergie est une installation comprenant deux à plusieurs chaudières utilisant deux combustibles différents.



Le maître d'ouvrage doit se poser la question de la nécessité ou non de garantir une continuité de la production de chaleur sur le site. En effet, si une coupure de chauffage momentanée est envisageable sur un gymnase ou une salle communale, il est plus difficile de l'envisager sur des logements, une école ou une maison de retraite. En fonction de la sensibilité du site, les installations sont généralement de type bi-énergie, quelle que soit la puissance.

Le dimensionnement d'une chaudière bois résulte d'un compromis répondant aux contraintes technico-économiques suivantes :

- faire fonctionner un maximum la chaudière bois à puissance nominale et donc à pleine charge ;
- solliciter la chaudière bois au-dessus de son seuil de puissance minimale (environ 25%) ;
- minimiser l'investissement en équipements bois, tout en couvrant un maximum les besoins du site (environ 80 à 90%).

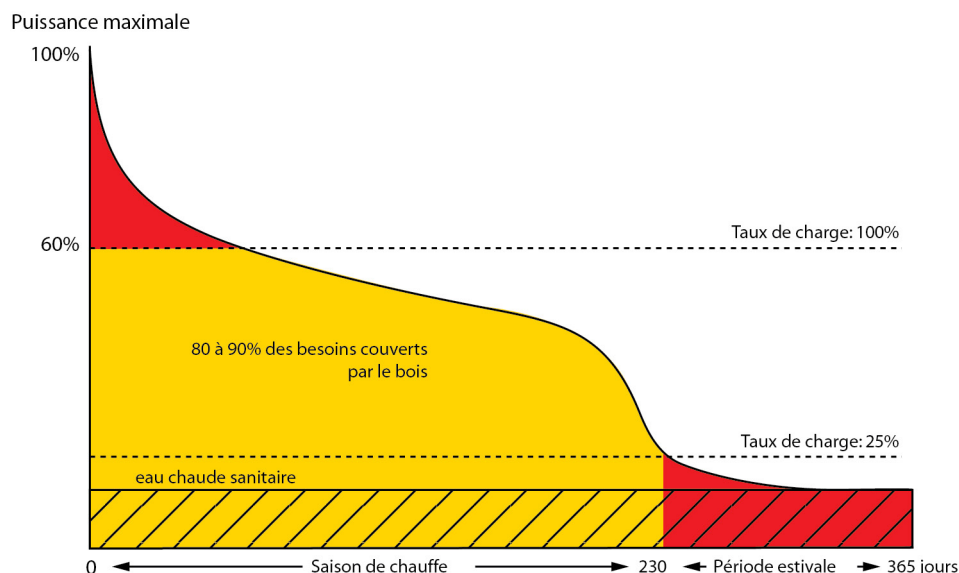
Pour les installations présentant une puissance supérieure à 200 kW, il est fortement recommandé au maître d'ouvrage de s'inscrire dans une solution bi-énergie et donc de prévoir une chaudière en appoint utilisant de préférence un combustible fossile. En effet, la disponibilité d'un second combustible en appoint (gaz naturel ou fioul) permet d'optimiser techniquement et économiquement le dimensionnement du générateur bois en diminuant sa puissance.

Commentaire

Une installation bi-énergie permet en outre de rassurer le maître d'ouvrage. Il dispose d'un secours : si la chaudière bois est à l'arrêt (pour cause d'entretien, de panne ou de problème d'approvisionnement du combustible bois), la chaudière d'appoint est capable de couvrir tout ou en partie les besoins du site.

La (Figure 34) représente la monotone de chauffage d'une installation. Elle est établie en comptabilisant, pour un appel de puissance donné, le nombre de jours où cette puissance est appelée.

On constate qu'un dimensionnement aux alentours de 60% de la puissance maximale permet d'atteindre un taux de couverture global des besoins de chauffage annuels par le bois compris entre 80 et 90%. La plage de modulation de la chaudière bois est ainsi optimisée sur l'ensemble de l'année.



▲ Figure 34 : Le principe de la bi-énergie : monotone des besoins thermiques

La puissance de la (ou des) chaudière(s) d'appoint correspond à l'appel de puissance maximum déterminé pour le site considéré.

La (ou les) chaudière(s) d'appoint couvre(nt) le complément des besoins pendant les périodes les plus froides et les plus douces de l'année, durant lesquelles la chaudière bois ne peut pas assurer correctement la production de chaleur :

- en période très froide, lorsque la puissance appelée est supérieure à la puissance du générateur bois ;
- en fin de demi-saison et en été, quand la puissance appelée est inférieure au minimum technique de fonctionnement de la chaudière bois (soit environ 25% de sa puissance nominale).

La mise en marche des chaudières bois et d'appoint est gérée en cascade par la régulation. La continuité de la fourniture d'énergie du site est ainsi assurée, y compris lors des arrêts techniques de la chaudière bois (ramonage par exemple) ou si un problème survient sur l'installation.



La solution bi-énergie doit de préférence être couplée à la mise en place d'un ballon d'hydroaccumulation d'une capacité suffisante.



Calcul de la puissance à installer

5



Le choix de la puissance à installer en chaufferie pour assurer le chauffage du bâtiment et la production d'eau chaude sanitaire (ECS) est fonction de :

- la puissance nécessaire aux seuls besoins en chauffage du bâtiment (P_{CH});
- la puissance maximale pour l'eau chaude sanitaire (P_{ECS});
- la puissance moyenne pour l'eau chaude sanitaire (P_{EC}).

En général, la puissance installée en chaufferie est la plus grande des deux valeurs suivantes : (P_{ECS}) ou ($P_{CH} + P_{EC}$).

5.1. • La puissance maximale de chauffage

La puissance maximale de chauffage est définie comme suit :

$$P_{CH} = DP \times (T_{cons} - T_{base})$$

Avec :

- P_{CH} : puissance maximale de chauffage en kW ;
- DP : déperditions en kW/K ;
- T_{cons} : température intérieure de consigne de chauffage en °C ;
- T_{base} : température extérieure de base du lieu en °C.

Commentaire

Les déperditions thermiques sont calculées selon la norme NF EN 12831 et le complément national NF P 52-612/CN.



5.2. • La puissance maximale pour l'eau chaude sanitaire

La puissance nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire se définit par rapport aux besoins journaliers (fonction du type de l'application notamment) et au système de production (production instantanée, semi-instantanée, semi-accumulée et accumulée).

Commentaire

L'évaluation de la puissance appelée pour l'eau chaude sanitaire est décrite dans les Recommandations de l'AICVF « Eau chaude sanitaire – Concevoir les systèmes » de 2004.

5.3. • La puissance moyenne pour l'eau chaude sanitaire

P_{EC} est la puissance moyenne permettant d'assurer les besoins moyens journaliers B_{EC} . Les besoins moyens journaliers correspondent à l'énergie nécessaire pour préparer le puisage journalier V_j et compenser les pertes de distribution.

La puissance P_{EC} est définie comme suit :

$$P_{EC} = (1,16 \times V_j \times (T_c - T_f)) / (1000 \times t_j) + \text{pertes}$$

Avec :

- P_{EC} : puissance moyenne pour l'eau chaude sanitaire en kW ;
- V_j : consommation moyenne journalière en litres ;
- T_c : température de consigne de stockage de l'eau chaude sanitaire en °C ;
- T_f : température de l'eau froide en °C ;
- t_j : durée moyenne de réchauffage en heures. Une approche consiste à prendre 8 heures ;
- pertes : pertes du bouclage en kW.

5.4. • La puissance bois à installer

5.4.1. • Cas d'une installation mono-énergie

Pour une installation mono-énergie, la puissance de la chaudière équivaut à 100% de la puissance installée.



5.4.1. • Cas d'une installation bi-énergie

Dans le cas d'une installation bi-énergie, la puissance installée doit permettre de couvrir entre 80 et 90% des besoins. On introduit la notion de taux de couverture bois, noté $\tau_{\text{couverture bois}}$, que l'on définit par la formule suivante :

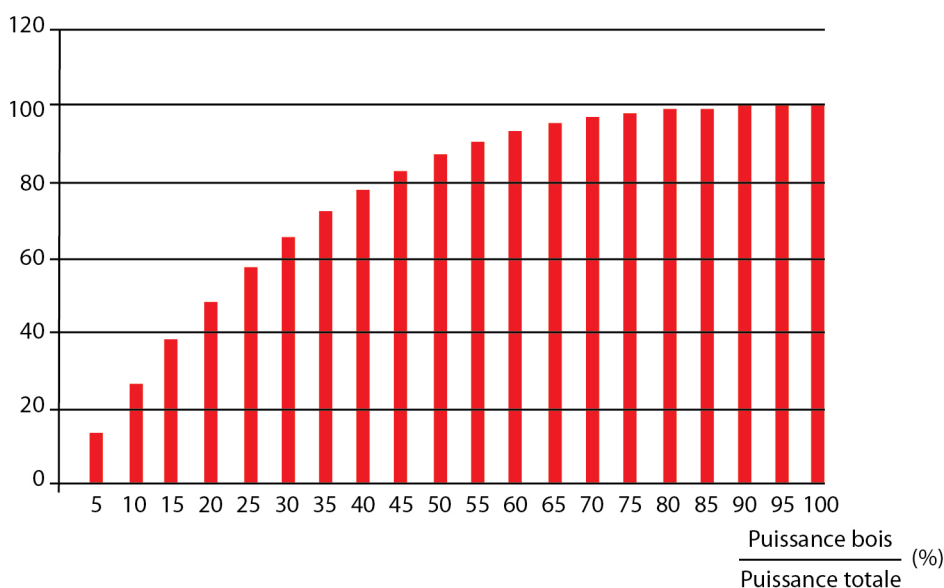
$$\tau_{\text{couverture bois}} = B_{\text{bois}}/B_{\text{tot}} = 1 - (1 - P_{\text{bois}}/P_{\text{tot}})^3$$

Avec :

- $\tau_{\text{couverture bois}}$: taux de couverture de la biomasse ;
- B_{bois} : besoins annuels couverts par la biomasse en kWh ;
- B_{tot} : besoins annuels totaux en kWh ;
- P_{bois} : puissance de la biomasse en kW ;
- P_{tot} : puissance totale installée en kW.

Le taux de couverture bois ne dépend ni des caractéristiques météorologiques du site, ni des caractéristiques des locaux ou de leur occupation mais seulement du rapport entre la puissance bois et la puissance totale installée. On donne (Figure 25), l'évolution du taux de couverture bois en fonction du rapport entre la puissance de la chaudière bois et la puissance totale installée.

Taux de couverture bois (%)



▲ Figure 25 : Evolution du taux de couverture bois en fonction du rapport entre la puissance de la chaudière bois et la puissance totale installée

Si l'on envisage par exemple de couvrir 90% des besoins par le bois (les 10% restants étant des besoins trop extrêmes), le choix se porte sur une chaudière bois d'une puissance nominale d'environ 55% de la puissance totale installée (Figure 25).

Si une chaudière bois d'une puissance nominale d'environ 40% de la puissance totale installée est choisie, elle permet de couvrir près de 80% des besoins.

Viser un taux de couverture des besoins compris entre 70 et 95% et donc une puissance de chaudière bois entre 40 et 70% de la puissance maximale installée est un bon compromis.

5.5. • La puissance d'appoint à installer

Dans la chaufferie, la puissance installée est la somme des puissances nominales de la chaudière bois et de l'appoint.

Il est nécessaire de dimensionner la puissance du générateur d'appoint pour que la puissance installée soit supérieure à l'appel maximal de puissance pour la température extérieure de base du site considéré.

Commentaire

La surpuissance de la chaudière d'appoint permet d'absorber les variations importantes de régime lors d'une remise en route après un arrêt ou une période de ralenti.

Le générateur d'appoint est dimensionné selon l'une des deux possibilités suivantes :

- il couvre 50% des besoins maximums de chauffage. Il s'agit alors d'une énergie purement d'appoint ;
- il couvre 100% des besoins maximums de chauffage. Il s'agit alors d'un secours.

Le choix d'un système de chauffage d'appoint ou de secours est guidé par les éléments de la (Figure 26).

	Appoint	Secours
Avantages	Faible investissement par rapport à une installation 100% bois	Secours total en cas d'incident sur la chaudière bois
	Faible encombrement	
	Grande souplesse de fonctionnement	
Inconvénients	Ne réalise pas un secours total en cas d'incident sur la chaudière bois	Coût d'investissement élevé sauf si une installation pouvant être utilisée en appoint existe déjà
		Encombrement important de l'ensemble chaufferie

▲ Figure 26 : Avantages et inconvénients d'une solution bi-énergie avec appoint ou secours



A puissance identique, le coût d'une chaudière bois est plus élevé que celui d'une chaudière à combustible traditionnel (gaz, fioul).





En conclusion :

- en présence d'un générateur de chauffage existant, il est recommandé de le conserver et de l'utiliser comme un secours ;
- en absence de générateur existant (dans le cas d'un projet neuf par exemple), la chaufferie doit être composée :
 - d'une chaudière bois dimensionnée à 60% des déperditions du bâtiment à chauffer à la température extérieure de base ;
 - d'un appoint dimensionné à 50% des déperditions du bâtiment à chauffer à la température extérieure de base.

5.6. • Les températures de relève et limite

5.6.1. • La température de relève

La température de relève (notée $T_{\text{relève}}$) correspond à température extérieure limite en dessous de laquelle la chaudière bois ne fournit plus assez de puissance pour répondre à la demande : il faut alors faire fonctionner l'appoint en complément de la chaudière bois. Elle est calculée par la formule suivante :

$$T_{\text{relève}} = (T_{\text{cons}} - (P_{\text{bois}} - P_{\text{ECS}})) / DP$$

Avec :

- T_{cons} : température intérieure de consigne de chauffage en °C ;
- P_{bois} : puissance nominale de la chaudière biomasse en kW ;
- P_{ECS} : puissance maximale d'ECS en kW ;
- DP : déperditions en kW/K.

5.6.2. • La température limite

La température limite (notée T_{limite}) correspond à la température extérieure au-dessus de laquelle la chaudière bois fonctionne à moins de 30% de sa puissance nominale pour répondre à la demande. Le taux de charge étant alors trop faible, la chaudière bois est arrêtée et la chaudière d'appoint démarrée. Elle est calculée par la formule suivante :

$$T_{\text{limite}} = (T_{\text{cons}} - (0,3 \times P_{\text{bois}} - P_{\text{ECS}})) / DP$$

Avec :

- T_{cons} : température intérieure de consigne de chauffage en °C ;
- P_{bois} : puissance nominale de la chaudière biomasse en kW ;
- P_{ECS} : puissance maximale d'ECS en kW ;
- DP : déperditions en kW/K.

5.7. • Le volume du silo de stockage à installer

5.7.1. • Analyse contextuelle

Le concepteur doit proposer une configuration de silo adaptée aux futures livraisons sur le site de la chaufferie et donc à la filière d'approvisionnement mise en place. Cela nécessite de :

- connaître les filières d'approvisionnement existantes sur le territoire, le cas échéant en se faisant accompagner par un animateur local de la filière bois énergie ;
- définir, en concertation avec le maître d'ouvrage, la solution d'approvisionnement la plus probable.

Deux configurations peuvent se présenter :

- une chaufferie associée à une plate-forme de stockage de bois ;
- une chaufferie livrée régulièrement tout du long de l'année.

La suite du document concerne le dimensionnement d'un silo correspondant à la seconde configuration de chaufferie, donc livrée régulièrement tout au long de l'année.

5.7.2. • Analyse multifactorielle

Outre la puissance nominale de la chaudière et le type de combustible utilisé, le dimensionnement du volume de stockage d'un silo doit intégrer plusieurs paramètres, de natures différentes, tels que :

- la place disponible pour l'implantation du silo selon la configuration prévue ;
- le mode d'extraction du combustible envisagé ;
- le volume mort du silo selon le mode constructif prévu ;
- l'autonomie souhaitée ;
- la capacité volumique des camions de livraison envisagés ;
- la disponibilité des équipements et du personnel sur le site.

Une fois intégrées les notions de disponibilité foncière et d'intégration architecturale (à analyser projet par projet), les deux facteurs principaux intervenant dans le dimensionnement du silo sont l'autonomie souhaitée et le mode de livraison.





5.7.3. • Détermination du volume de stockage

Détermination du volume de silo utile

Le volume utile du silo de stockage exprimé en m³ se détermine à partir de la formule suivante :

$$V_{\text{utile}} = (A \times P \times t) / (\rho \times \text{PCI} \times \eta)$$

Avec :

- V_{utile} : volume utile du silo correspondant au volume de bois réellement disponible en m³ ;
- A : autonomie de l'installation choisie en fonction de l'activité des bâtiments à chauffer et de la fréquence de livraison. C'est la durée de fonctionnement (en jours) à la puissance nominale entre deux livraisons de combustible. Le tableau de la (Figure 27) rappelle les temps d'autonomie les plus courants ;
- P : puissance nominale des chaudières bois en kW ;
- t : temps de fonctionnement journalier (en heures) à puissance nominale. Il permet d'obtenir l'énergie (en kWh) dépensée par l'installation au cours d'une journée. Ce temps de fonctionnement varie entre 15 et 18 heures selon le type d'occupation des bâtiments à chauffer ;
- ρ : masse volumique du combustible en kg dans 1 Mètre cube Apparent (MAP). Elle dépend de la forme du combustible. En réalité, la masse volumique du combustible dans le silo est plus importante que celle mesurée sur 1 MAP de bois à cause de l'effet de tassement et de compression engendré par le mouvement des extracteurs ;
- PCI : pouvoir calorifique inférieur du combustible. Il dépend de l'humidité et de l'essence du bois. Par exemple, le PCI anhydre est de 5 kWh/kg pour les feuillus et de 5,3 kWh/kg pour les résineux ;
- η : rendement de combustion de la chaudière bois. Il est de 85% pour une chaudière au bois fonctionnant correctement.

Activités des bâtiments		Autonomie
Industries	24h/24 – 7j/7	3 jours
	Fermées le week-end	2 jours
Collectivités		Minimum 3 jours

▲ Figure 27 : Temps d'autonomie les plus courants en fonction de l'activité et de l'occupation du bâtiment à chauffer

En outre, le volume utile du silo doit être cohérent avec le volume des bennes de livraison. Le tableau de la (Figure 28) donne les principaux modes de livraison du bois.



Mode de livraison			Silo	
Photos	Type	Capacité	Volume	Type
1	Camion souffleur	10 à 30 m ³	30 à 50 m ³	Aérien
2	Tracteur et benne agricole	20 à 40 m ³	35 à 70 m ³	Enterré ou aérien
3	Camion porte-conteneurs	40 m ³	70 m ³	Enterré
4	Camion à fond mouvant	90 m ³	120 à 250 m ³	Enterré

▲ Figure 28 : Les principaux modes de livraison du bois et leurs capacités. Les photos sont en (Figure 29)



▲ Figure 29 : Vue des principaux modes de livraison du bois. Voir la (Figure 28)

Avant une livraison, pour définir la quantité de bois à livrer, il faut prendre en compte le volume de bois restant dans le silo. Une réserve de sécurité de 25% est conseillée tout en permettant le déchargement d'une benne complète.

Commentaire

Il n'est pas conseillé d'attendre que le silo soit complètement vide pour commander la prochaine livraison.

Détermination du volume de silo à construire

Le volume du silo à construire est aussi désigné volume en eau (V_{eau}). Il correspond au volume utile (V_{utile}) auquel il est ajouté, selon les modes constructifs, les volumes supplémentaires que constituent le volume mort (V_{mort}) et le volume de réserve ($V_{\text{réserve}}$).

Il est déterminé comme suit :

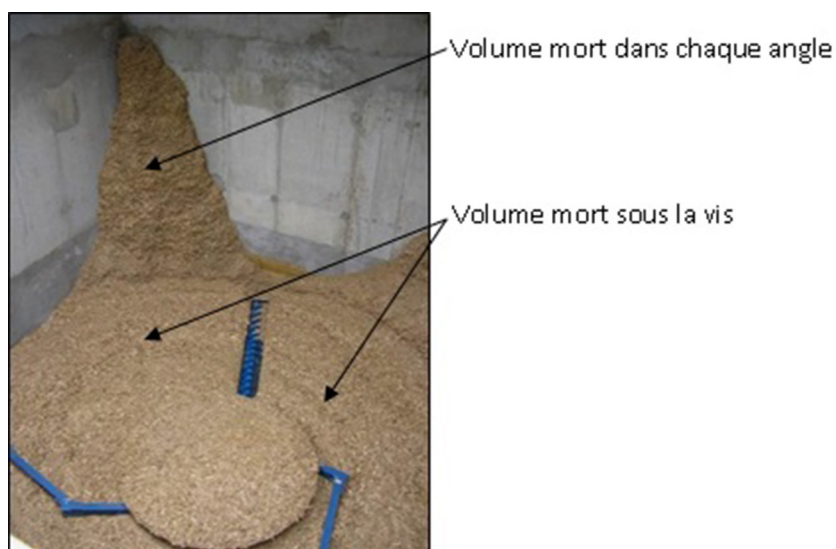
$$V_{\text{eau}} = V_{\text{utile}} + V_{\text{mort}} + V_{\text{réserve}}$$



Avec :

- V_{mort} : volumes qui ne pourront pas être remplis lors des livraisons et qui ne pourront pas être dessilés (angles des silos carrés avec dessilage rotatif par exemple). Ils comprennent également les volumes situés sous le système de dessilage, plus ou moins importants selon les technologies. Tous ces volumes représentent environ 30% pour les silos à géométrie carrée avec dessilage rotatif et de 15 à 20% pour les silos rectangulaires, à échelles de racleurs ;
- $V_{\text{réserve}}$: volume de réserve permettant d'assurer une livraison avant que le silo ne soit complètement vide. Ce volume peut correspondre à environ un jour d'autonomie.

On visualise (Figure 30) un important volume mort dans les 4 angles du silo (à base carrée) et sous l'extracteur rotatif en fond de silo (notamment lorsque ce dernier est en biais).



▲ Figure 30 : Volumes morts du silo de stockage

Exemples de volume de silo à construire

Pour les installations de faible puissance (inférieure à 150 – 200 kW), le mode de livraison est le facteur principal. Le concepteur dimensionne le silo afin qu'il puisse accueillir le volume de bois correspondant à une livraison complète (caisson, benne agricole, camion souffleur...), en tenant compte des volumes morts. Le volume du silo à construire (V_{eau}) correspond alors, en première approche, à 1,7 fois le volume de livraison. Dans ces conditions, l'autonomie s'élève à une quinzaine de jours minimum et peut atteindre un mois.

Commentaire

Par exemple, en considérant l'hypothèse ci-dessus, si le volume de livraison est de 30 m^3 , le volume en eau du silo est d'environ 50 m^3 .



Pour les installations de moyenne puissance (> 150 à 200 kW), l'autonomie de l'installation est le facteur principal. Le concepteur dimensionne le volume du silo pour que l'installation dispose d'une autonomie entre deux livraisons, selon les cas, de 3 à 10 jours, pendant les périodes les plus froides de l'année.

Commentaire

Considérons l'exemple d'une chaudière de 350 kW de puissance nominale et de 85% de rendement pour laquelle l'autonomie de l'installation est le facteur principal.

Le combustible utilisé est de type plaquettes forestières présentant un PCI de 2500 kWh/tonne, soit 2,5 kWh/kg, et une masse volumique apparente de 400 kg/MAP. L'autonomie souhaitée est de 4 jours et le temps de fonctionnement journalier de 18 h. Le volume mort du silo est considéré de 30%.

Le volume utile V_{utile} du silo est de :

$$V_{\text{utile}} = (A \times P \times t) / (\rho \times \text{PCI} \times \eta) = (4 \times 350 \times 18) / (400 \times 2,5 \times 0,85) = 30 \text{ m}^3$$

Le volume du silo à construire V_{eau} est de :

$$V_{\text{eau}} = V_{\text{utile}} + V_{\text{mort}} + V_{\text{réserve}} = 30 + (30 \times 0,3) + 7,5 = 46,5 \text{ m}^3$$

5.8. • La quantité annuelle de cendres à prévoir

On rappelle que dans une chaufferie bois, on distingue deux types de cendres (cf. 11) :

- les cendres provenant de la combustion du bois collectées sous foyer qui représentent la partie la plus importante en quantité. Ces cendres présentent des teneurs significatives en potasse, en chaux et en magnésium ;
- les particules issues de la filtration des fumées également appelées cendres volantes. Elles concentrent les éléments traces métalliques considérés comme polluants.

Ces deux types de cendres sont collectés de façon séparative. Les cendres volantes sont évacuées en centre d'enfouissement technique (centre de classe 1) et aucune valorisation ne peut être envisagée. La quantité de cendres provenant de la combustion peut être estimée de la manière suivante (Figure 31).

	Traitement par voie sèche	Traitement par voie humide
Tonnage en cendres en tonnes/an	$T_c = C_{\text{bois}} \times (1-h) \times t_c$	$T_c = 1,4 \times C_{\text{bois}} \times (1-h) \times t_c$
Volume annuel de cendres produites en m ³ /an	$V_c = T_c / 0,55$	$V_c = T_c$

▲ Figure 31 : Estimation de la quantité de cendres provenant de la combustion



Avec

- T_c : tonnage en cendres par an ;
- V_c : volume annuel de cendres produites en m^3 ;
- t_c : teneur en cendres en % (dans la formule, pour une teneur de 1%, noter 0,01) ;
- C_{bois} : consommation annuelle de bois de la chaufferie en tonnes ;
- h : taux d'humidité moyen sur masse brute du combustible en % (dans la formule, pour une humidité de 30%, noter 0,3).



Le type de combustible bois utilisé dans la chaufferie a une grande influence sur la quantité de cendres produites.

Le génie civil

6



6.1. • Le local chaufferie

Les deux principaux textes s'appliquant aux chaufferies d'une puissance supérieure à 70 kW sont l'arrêté de 23 juin 1978 modifié ainsi que l'arrêté du 25 juin 1980 modifié relatif aux établissements recevant du public (ERP).

Implantation

Une chaufferie de puissance utile inférieure 2 MW peut être implantée en sous-sol, en rez-de-chaussée ou à l'extérieur du bâtiment.

Caractéristiques des parois

Les parois du local doivent présenter les caractéristiques minimales indiquées à la (Figure 32).

Parois	Implantation de la chaufferie		
	Sous-sol et rez-de-chaussée	Extérieur	
		d ≤ 10 m	d > 10 m
Plancher bas	M0, A2s1d0 ou A1 Coupe-feu 2 heures, EI120 REI 120	M0, A2s1d0 ou A1	M0, A2s1d0 ou A1
Plancher haut	M0, A2s1d0 ou A1 Coupe-feu 2 heures, EI120 REI 120	M0, A2s1d0 ou A1 Coupe-feu 2 heures, EI120 REI 120	M0, A2s1d0 ou A1
Murs latéraux	M0, A2s1d0 ou A1 Coupe-feu 2 heures, EI120 REI 120	M0, A2s1d0 ou A1 Coupe-feu 2 heures, EI120 REI 120	M0, A2s1d0 ou A1

d : distance de tout local habité ou occupé, d'un bâtiment tiers et de toute zone accessible au public voirie incluse

▲ Figure 32 : Caractéristiques minimales des parois constituant la chaufferie

Accès à la chaufferie

L'accès à la chaufferie peut être réalisé par une seule porte.

Dans le cas d'une chaufferie en sous-sol, il doit y avoir un accès minimal de plain-pied de 4 m².

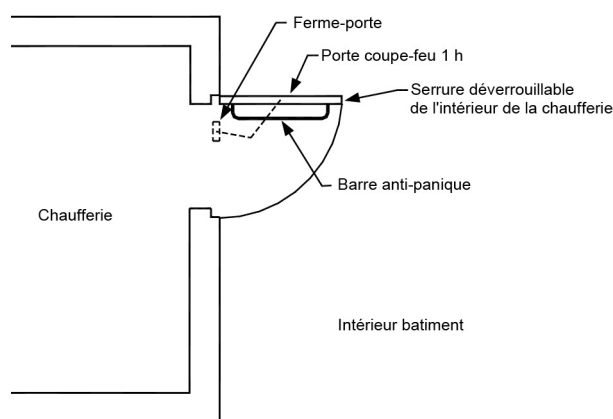
Dans le cas d'une chaufferie située à l'intérieur d'un bâtiment :

- pour les bâtiments d'habitation ou de bureaux, l'accès peut être direct par l'extérieur du bâtiment ou s'effectuer par des parties communes ;
- s'il s'agit d'un établissement recevant du public, l'accès peut être direct par l'extérieur du bâtiment ou s'effectuer par des zones non accessibles au public.

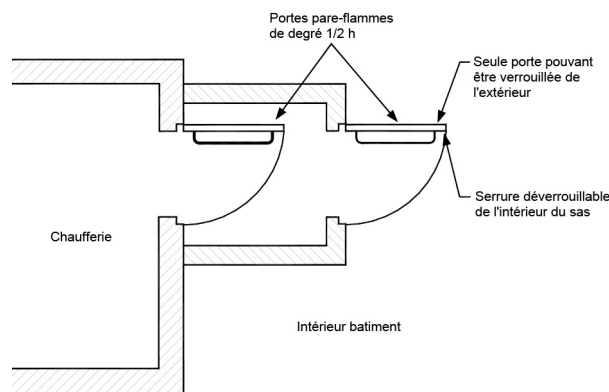
Dans le cas d'un accès direct par l'extérieur du bâtiment, la porte doit être coupe-feu 1/2 heure (ou EI 30) si elle est distante de moins de 10 mètres de tout bâtiment occupé ou de toute zone accessible au public. La porte est dispensée de tout degré de résistance au feu si la distance est de plus de 10 mètres.

Si l'accès s'effectue par l'intérieur du bâtiment, il doit être prévu soit :

- par une porte coupe-feu 1 heure (ou E I60) munie d'un ferme-porte (Figure 33) ;
- par un sas fermé par deux portes pare-flammes de degré 1/2 heure (ou E 30) s'ouvrant dans le sens de la sortie. Seule la porte entre le sas et le bâtiment peut se verrouiller de l'extérieur. Elle doit toutefois pouvoir être ouverte de l'intérieur du sas en toute situation (Figure 34).



▲ Figure 33: Porte d'accès à la chaufferie par l'intérieur du bâtiment



▲ Figure 34 : Sas d'accès à la chaufferie par l'intérieur du bâtiment

Dimensions de la chaufferie

Les dimensions minimales imposées par la réglementation doivent être respectées :

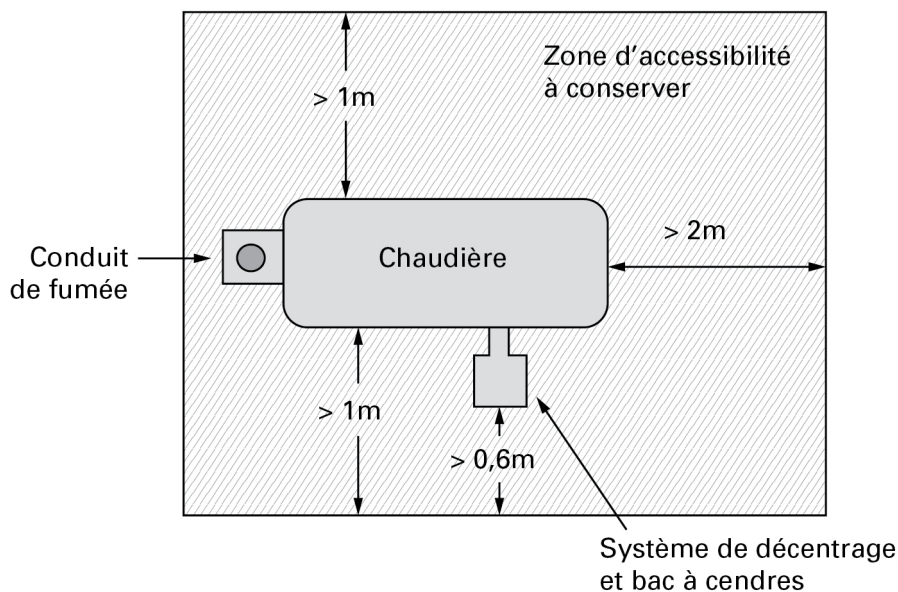
- la hauteur minimale sous plafond d'une chaufferie doit être de 2,20 mètres ;
- la hauteur libre au-dessus du platelage des passerelles de service doit être de 2 mètres au minimum ;
- les générateurs une fois installés doivent permettre de ménager un espace libre de 0,50 mètre entre eux ;

Il doit, en outre, être aménagé un espace suffisant pour permettre une exploitation normale et en particulier :

- l'usage des outils de chauffe et de nettoyage ;
- l'accès aux organes de réglage, de commande, de régulation et de contrôle ainsi qu'aux moteurs électriques ;
- les gros travaux d'entretien et de renouvellement du matériel.

Chaque fabricant de chaudière fournit une documentation complète sur les opérations de maintenance et les espaces libres nécessaires.

D'une manière générale, il est souhaitable de conserver des distances minimales telles qu'indiquées dans la (Figure 35).



▲ Figure 35 : Dimensions de la zone d'accessibilité à conserver a minima

Ventilation de la chaufferie

La ventilation de la chaufferie doit être permanente et constituée :

- d'une introduction d'air en partie basse destinée à la ventilation du local et l'alimentation en air de la (ou des) chaudière(s) ;
- d'une évacuation d'air en partie haute. Cette évacuation en partie haute du local peut être constituée par un conduit vertical débouchant à l'extérieur.

Les ventilations doivent être conçues et disposées de telle manière :

- qu'elles ne provoquent pas de gêne au voisinage de la chaufferie ;
- qu'elles soient protégées de l'action du vent ;
- qu'elles ne provoquent pas un siphonnage entre l'entrée d'air et le dispositif d'évacuation d'air ou le conduit de fumée ;
- qu'en l'absence de vent :
 - la dépression en chaufferie par rapport à l'extérieur ne dépasse pas 2,5 Pascals ;
 - la température ambiante moyenne en chaufferie ne dépasse pas 30°C tant que la température extérieure ne dépasse pas 15°C.

Il est nécessaire de se conformer aux prescriptions du fabricant de la (ou des) chaudière(s) concernant l'amenée d'air nécessaire.

En l'absence d'indication, il est généralement utilisé les valeurs suivantes :

- ventilation basse : section de 0,03 dm²/kW de puissance utile avec un minimum de 2,5 dm² ;
- ventilation haute : section de 0,02 dm²/kW de puissance utile avec un minimum de 2,5 dm².

L'ensemble des équipements de la chaufferie génère des émissions sonores qui imposent un traitement acoustique au minimum pour les ventilations hautes et basses, par la mise en place de pièges acoustiques (baffles) dans les veines d'air.

Il convient que le flux de chaleur en provenance de la chaufferie ne provoque pas dans les logements, bureaux ou zones accessibles au public, contigus, une élévation de la température intérieure résultante de plus de 2°C. Cette exigence peut engendrer, dans certains cas, le traitement thermique des parois contiguës.

Autres équipements de la chaufferie

L'alimentation électrique de la chaufferie doit être conforme aux normes NF C 14-100 et NF C 15-100.

Deux dispositifs de coupure électrique, l'un pour le circuit d'éclairage, l'autre pour le circuit d'alimentation principale, doivent être placés à l'extérieur du local. Chaque dispositif doit être convenablement identifié et facilement accessible. Il doit être constitué par un interrupteur à coupure omnipolaire ou un dispositif d'arrêt d'urgence. Dans le cas d'un interrupteur, une plaque doit signaler le sens de la manœuvre.

L'éclairage de la chaufferie doit être suffisant pour permettre la conduite de la chaufferie et la lecture facile de tous les équipements de réglage, contrôle et de sécurité.

Le passage dans la chaufferie de toutes canalisations électriques ou de fluides combustibles non nécessaires à son fonctionnement est interdit.

Les moyens de lutte contre l'incendie sont constitués, pour les combustibles solides ou liquides, au voisinage immédiat de la porte en un endroit facilement accessible :

- d'un dépôt de sable d'au moins 0,1 m³ et d'une pelle ;
- de deux extincteurs portatifs pour feux de classe 34 B1 ou B2 au moins par brûleur, avec un maximum exigible de quatre.

Dans le cas particulier des chaufferies en sous-sol, il doit être prévu un moyen d'évacuer en urgence les fumées caractérisé par :

- un conduit circulaire ou rectangulaire de 16 dm² de section ayant au moins 20 cm dans sa plus petite dimension. Ce conduit doit déboucher à l'extérieur, au niveau du sol, en un point permettant en cas de feu la mise en manœuvre du matériel de ventilation des sapeurs-pompiers ;
- un orifice de 40 cm minimal de diamètre ou de côté ou demi-raccord DN 300 ;
- une paroi du conduit coupe-feu ½ heure (ou EI 30) et une résistance aux chocs suffisante ;



- un orifice extérieur fermé à l'aide d'un dispositif démontable sans outillage. Il doit être signalé par une plaque portant la mention « Gaine pompiers chaufferie ».

6.2. • Le silo de stockage

On précise ici les spécifications concernant la ventilation, les accès (nombre et comportement au feu), les règles de sécurité incendie...

Les dimensions du silo

Les dimensions du silo de stockage sont données par l'autonomie souhaitée et le mode de livraison du combustible. Le volume utile doit en effet être cohérent avec le volume des bennes de livraison (cf. 5.7).



Si l'autonomie réelle du silo est inférieure à celle prévue, la production par le générateur d'appoint risque d'engendrer une baisse du taux de couverture bois et un surcoût de fonctionnement.

Les dimensions du silo (hauteur, largeur et longueur) doivent prendre en compte les contraintes suivantes :

- la hauteur du silo est limitée par un maximum qui dépend du mécanisme d'extraction utilisé. Une hauteur trop importante augmente la charge portée par le dispositif d'extraction. Une hauteur faible permet une meilleure extraction, sans risque de dysfonctionnement. Généralement, on recommande de ne pas dépasser 4 m de hauteur de silo ;
- la largeur doit être supérieure à la hauteur pour éviter les risques de voûtage important dans le silo (notamment avec les écorces, sciures, copeaux et les arbres de texture très fibreuse comme le peuplier) (Figure 37) ;
- la base du silo doit être adaptée au mécanisme d'extraction utilisé. Une base carrée (avec un maximum de 5 mètres de côté) est recommandée pour un mécanisme d'extraction de type extracteur rotatif. Une base rectangulaire abîme les parois du silo (et l'extracteur) à cause de l'alternance entre un déploiement faible et important venant frotter ou créer des contraintes sur les parois.

Si l'extraction est réalisée par dessilage par racleurs, il n'y a pas de contraintes dimensionnelles. Toutefois, des silos plus longs et moins profonds doivent être privilégiés.

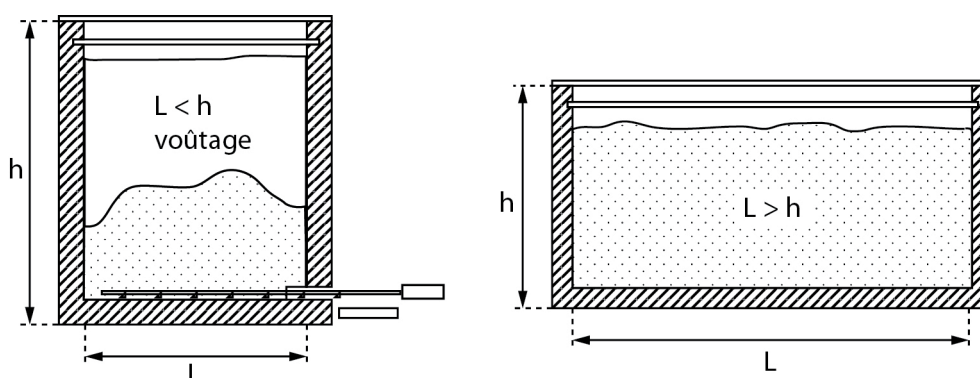
Le tableau (Figure 36) fixe les hauteurs limites de silo à respecter pour les différents types d'extraction.

Système d'extraction	Combustibles	Hauteur limite en mètre	
		Maximale	Conseillée
Par vis, par pales	Faible granulométrie	8	4
Par échelles racleuses	Tout type	10	4

▲ Figure 36 : Hauteurs limites de silo à respecter en regard du système d'extraction



Dans le cas d'un silo de plain-pied avec livraison par benne basculante la hauteur à prévoir est de 7,5 mètres minimum de façon à permettre le basculement de la benne et le déchargement complet de la charge de combustible.



▲ Figure 37 : Risque de voûtage si la largeur du silo est inférieure à la hauteur

Le volume d'un silo n'est jamais totalement utilisable. Le coefficient de remplissage est fonction du rapport section/hauteur et du nombre de points de déchargement. Afin de limiter les pertes de volumes, certains fabricants proposent des systèmes de répartition :

- barres à mi-hauteur du silo dispersant le bois lors de sa chute ;
- transporteur-distributeur disposé au-dessus du silo et permettant de multiplier les points de déchargement.

Face au surcoût induit par de tels systèmes, il est avantageux de prévoir plusieurs trappes mobiles à l'extrémité supérieure des silos maçonnés afin de mieux répartir le combustible dans le volume de stockage.

En outre, l'espace vide sous l'extracteur rotatif est comblé par du bois « perdu » (Figure 38). La mise en place d'un plancher au niveau de la vis, sous les pales, est envisageable (Figure 38). Il évite la perte de combustible sous les pales et limite également le risque de casse des pales.



▲ Figures 38 : Exemples de système d'extraction rotatif sans et avec plancher

Pour les systèmes d'extraction à pales rotatives, le déchargement par benne doit être réalisé avec précaution. Lorsqu'elles sont visibles, il peut être recommandé de replier les bras sous le plateau avant le déchargement du combustible. Cela évite :

- de casser les ressorts et les fixations ;
- la flexion des bras entraînant une usure prématurée du renvoi d'angle.



Le montant des travaux de génie civil du silo étant très important, il est indispensable d'optimiser sa capacité réelle de stockage.

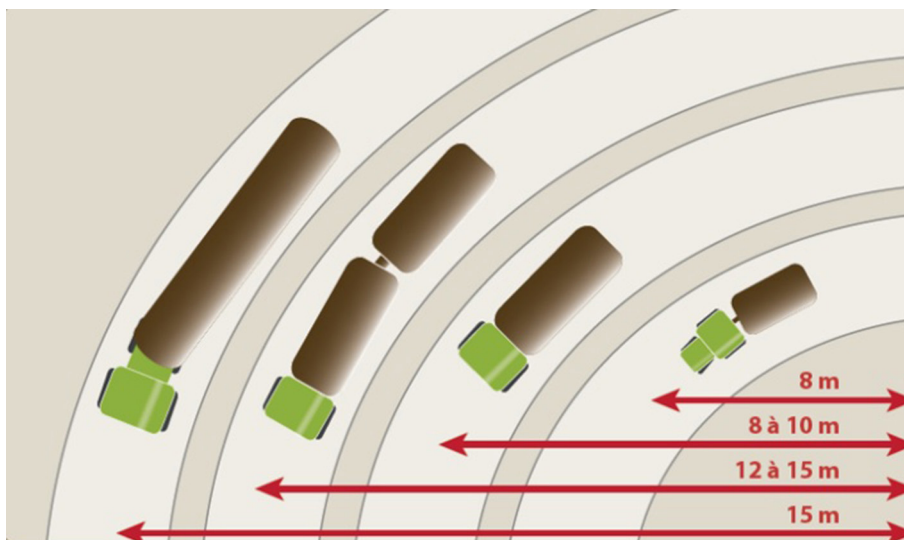
L'accès au silo

Les contraintes d'accès, la configuration et l'implantation du silo conditionnent le mode de livraison et le fournisseur.

Les accès au silo doivent être prévus en tenant compte :

- des caractéristiques des camions de livraison (hauteur, largeur, rayon de braquage poids total en charge...) ;
- des circulations : arrivée et départ des camions, aire de retournement, voie renforcée pour le demi-tour des camions ;
- des conditions hivernales : il est nécessaire de limiter la pente d'accès au silo à 3% ;
- de la nécessité que le camion recule en ligne droite vers le silo.

La (Figure 39) donne des exemples indicatifs de rayons de braquage pour les accès par camions.



▲ Figure 39 : Rayons de braquage pour les accès par camions

Véhicules de livraison	Largeur (m)	Hauteur (m)	Longueur de l'ensemble (m)	Rayon de braquage (m)	Poids en charge (tonnes)
Tracteur agricole et remorque	2,5	2 à 3,5	8 à 10	8	10 à 15
Porteur	2,5	3,8	7 à 9	8 à 10	19
Porteur conteneur	2,5	4	13	12 à 15	40
Semi-remorque	2,5	3,8 à 4,4	11 à 15	15	38

▲ Figure 40 : Dimensions indicatives des véhicules de livraison

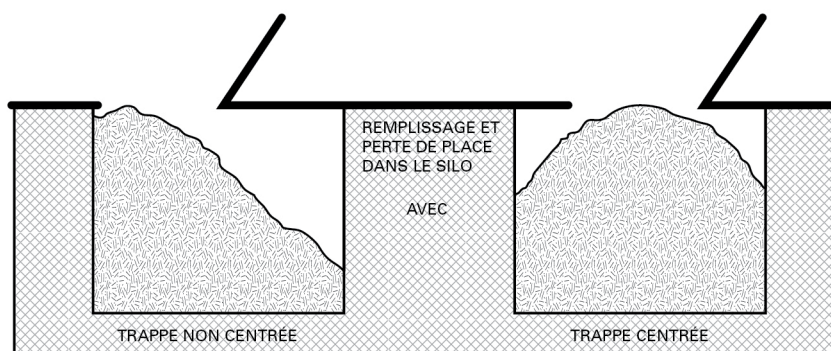
Commentaire

Le déplacement sur le site de l'approvisionneur potentiel, avant la fin des travaux, est recommandé pour faire valider les possibilités de livraison de combustible.

Les trappes de déchargement

La localisation et le nombre de trappes de déchargement dépendent de la taille du silo de stockage et de sa géométrie de façon à pouvoir optimiser son remplissage. La ou les trappes doivent être adaptées aux moyens de livraisons prévus, qui peuvent être très différents d'une configuration à l'autre.

Pour un gain de volume au moment du remplissage, la trappe doit être dans la mesure du possible centrée sur le silo (Figure 41).



▲ Figure 41 : Intérêt d'une trappe de livraison centrée sur le silo

Lorsque le bois entrant dans le silo continue son processus de séchage, de la condensation se forme sur la trappe. Une isolation (flocage) sur le dessous de la trappe permet d'éviter ce phénomène.

De façon à faciliter et réduire au maximum les opérations de manœuvre ainsi que les temps de déchargement, il est nécessaire de prévoir des ouvertures de trappe supérieures à la largeur de la benne de plus d'1 mètre. Il doit également être prévu une dimension minimale de trappe ouverte de 3 mètres de large et de 2,5 mètres de profondeur (Figure 42).

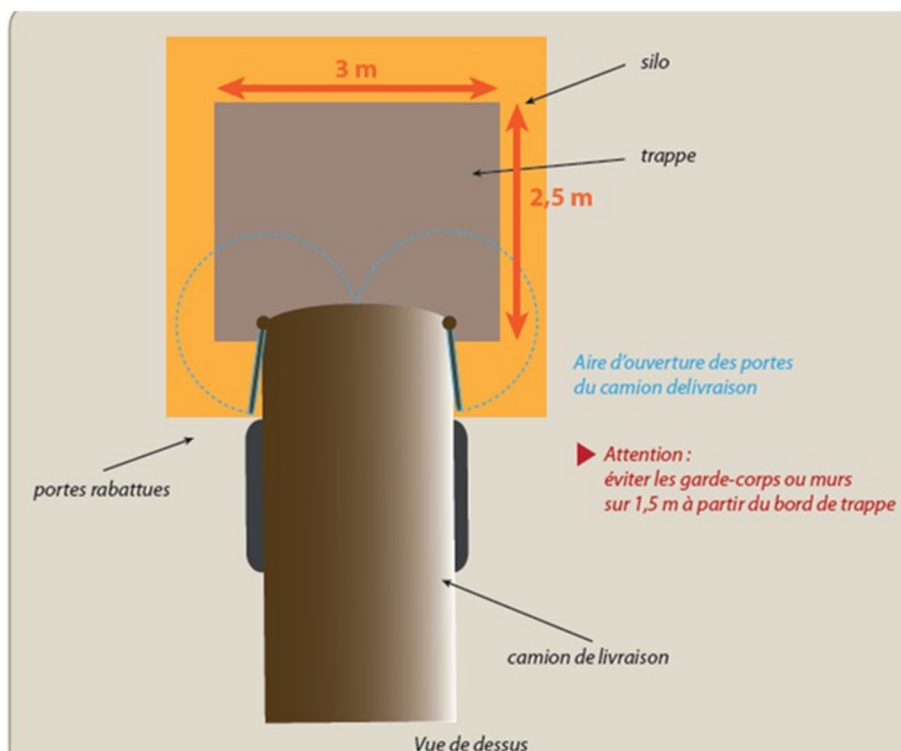
Il est recommandé un débord de silo afin d'éviter l'entrée de ruissellement des eaux de pluie. Il est d'au moins 20 cm par rapport au sol fini. Ce débord de silo sert également de système de butée pour les camions de livraison. Il doit être renforcé.

Les portes arrières du camion doivent être ouvertes au-dessus du silo. Pour faciliter l'opération, il est important de prévoir un garde-corps métallique permettant de sécuriser le travail du livreur de bois.



La mise en place de garde-corps ne doit pas bloquer l'ouverture des portes des camions au-delà de 90° et ne pas empêcher ainsi le basculement de la benne du camion.

Un déport du camion d'environ 2 mètres au-dessus du silo doit être possible afin d'éviter de la manutention en fin de remplissage.



▲ Figure 42 : Exemple de dimensions et position d'une trappe de déchargement

Aucune échelle ou autre moyen d'accès ne doit être laissé de manière permanente dans le silo.



Trop souvent, les agents assurant les livraisons prennent des risques lors de l'ouverture des portes des camions. Si la zone de livraison et le système de déchargement du silo compliquent les livraisons, le temps d'intervention du fournisseur sera plus long et pourra engendrer la modification du contrat d'approvisionnement et des conditions tarifaires. Dans certains cas, le surcoût de solutions plus efficaces en termes de commodités d'approvisionnement et d'autonomie réelle peut être compensé pas les économies de fonctionnement générées.

Un système de sécurité doit être mis en œuvre pour maintenir le silo fermé (cadenas) et pour le maintenir ouvert (système de blocage de la trappe). Dans le cas de trappes carrossables, la structure doit être renforcée de façon à supporter la charge du camion pouvant aller jusqu'à 8 tonnes par essieu.

Les trappes doivent être munies de grilles de protection pour :

- éviter les chutes de personnes dans le silo ;
- permettre au livreur de marcher dessus pour ouvrir les portes du camion.



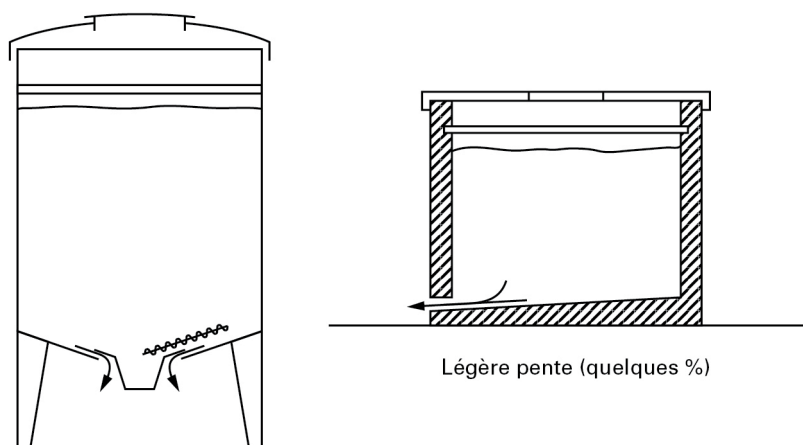
Les grilles de protection peuvent être :

- de type treillis : les mailles doivent avoir une taille maximale de 20 cm par 20 cm ;
- de type barreaux parallèles : les barreaux doivent être espacés d'au plus 10 cm.

Dans le cas de trappes horizontales, carrossables ou non, il est nécessaire de prévoir l'évacuation des eaux de ruissellement notamment par un système de collecte à l'intérieur du silo, en périphérie de la trappe.

L'évacuation des eaux

Le dispositif d'évacuation des eaux est fonction du type de silo. Pour un silo aérien ou de plain-pied, un simple drainage intérieur débouchant sur une grille d'égout est suffisant (Figure 43). Pour les silos en fosse ou semi-enterrés, il faut prévoir une pompe de relevage dans un regard indépendant du silo. Elle doit être accessible pour la maintenance et équipée d'une chaîne pour son extraction.



▲ Figure 43 : Exemples de drainages des silos de type aérien

Les parois du silo et l'accès

Lorsque le combustible est stocké dans un silo contigu à la chaufferie, il est considéré comme un local à risques importants. Les parois constituant ce local doivent donc avoir les mêmes caractéristiques que celles de la chaufferie.

Les parois du silo doivent être prévues pour résister à la contrainte de poids exercée par le combustible. A titre d'exemple, la masse volumique en vrac des granulés est d'environ 650 kg/m^3 et celle de plaquettes calibrées fines sèches est d'environ 350 kg/m^3 .

La réalisation d'un système coupe-feu de génie civil sur le mécanisme de transfert du combustible du silo à la chaudière étant très difficile de réaliser :

- le mécanisme de transfert est sous capotage et l'ensemble est muni d'une installation d'extinction automatique à eau

directement raccordée sur le réseau d'eau froide ou sur un ballon tampon réservé à cet effet ;

- une coupure coupe-feu, réalisée par un clapet, une écluse rotative ou un sprinkler, est disposée sur le dispositif d'introduction du combustible dans la chaudière.

Dans le cas où le silo est enterré ou semi-enterré, il faut s'assurer qu'aucune infiltration d'eau du sous-sol ne puisse survenir par la réalisation éventuelle d'un cuvelage.

Une attention doit être portée à la planéité du sol du silo, notamment dans le cas de mise en place de fonds racleurs. Dans ce cas, il est nécessaire de respecter les prescriptions du fabricant.

Il est parfois nécessaire d'accéder au silo depuis la chaufferie afin de :

- vérifier l'état du dispositif d'extraction et de convoyage ;
- procéder aux réparations en cas d'avarie ;
- contrôler le niveau de combustible dans le silo.

D'une manière générale, l'accès au silo s'effectue par la trappe de livraison du combustible.

Cas spécifique du silo à déchargement pneumatique

Le silo à déchargement pneumatique doit être étanche à l'air.

Commentaire

Pour éviter la poussière lors du remplissage, il convient de prévoir un joint étanche autour de la porte (et/ou de la trappe de visite) et de s'assurer de l'étanchéité des parois.

Le silo peut être :

- à pans inclinés avec une extraction par vis sans fin : le dessilage du combustible s'effectue par une vis sans fin logée au fond d'un canal aux pans inclinés ou en cône (40° minimum) permettant l'écoulement par gravité du combustible jusqu'à la vis qui les achemine ensuite vers le foyer ;
- à fond plat avec une extraction par dessileur.

Commentaire

Pour un vidage complet du silo, les pans inclinés sont installés dans le sens de la plus grande longueur.

Un tapis de protection en caoutchouc doit être suspendu à l'opposé de la bouche de remplissage (à 35 cm du mur) pour amortir le combustible projeté et éviter l'abrasion du mur.



Le silo est équipé d'un conduit de remplissage et d'un conduit d'aspiration des poussières. Il est nécessaire de prévoir :

- un raccord de remplissage (tube en métal le plus court possible, relié à la terre et orienté vers le tapis de protection). Il est placé au minimum à 25 cm du plafond et à 50 cm de la bouche d'aspiration des poussières. La connexion de remplissage se termine par un raccord pompier avec bouchon d'obturation. Le ou les raccords doivent être accessibles directement par le livreur (sans échelle) ;
- un raccord d'aspiration (ou évent) qui permet de raccorder l'aspirateur du livreur par l'intermédiaire d'une manchette de filtration des poussières (fixe ou mise en place par le livreur).

Commentaire

Le raccord d'aspiration (ou évent) évite une mise en pression du silo (dégagement de poussières fines) et préserve le combustible lors de la livraison.

Les volumes de livraison sont généralement de 10 à 30 m³.

Commentaire

Pour éviter la poussière lors du remplissage, il convient de prévoir un joint étanche autour de la porte (et/ou de la trappe de visite) et de s'assurer de l'étanchéité des parois.

Ventilation du silo

Une absence de ventilation du silo implique deux niveaux de risques :

- l'apparition de condensation et notamment sur les stocks de bois humides (humidité > 35%) dépourvus de circulation d'air en partie haute du silo. Elle peut être à l'origine d'une détérioration accélérée des équipements techniques et surtout du combustible bois ;
- la concentration atmosphérique en éléments nocifs (poussières, CO₂, CO...) : dans la mesure où le silo est accessible par du personnel technique, l'atmosphère ne doit pas présenter de risque particulier pour la santé. Or, l'expérience montre que les silos sont des lieux propices aux atmosphères poussiéreuses et peuvent, en cas de dysfonctionnement de la chaudière, présenter des concentrations dangereuses en CO₂ voire en CO.

Afin d'éviter toute accumulation de gaz de fermentation ou de condensation, il est donc nécessaire de ventiler le silo de stockage de combustible.

Les chaufferies bois ne disposent pas de réglementation particulière et s'inscrivent dans le cadre des chaufferies classiques à combustibles solides. L'arrêté du 25 juin 1980 modifié concernant les établissements recevant du public stipule que les soutes de stockage du combustible



doivent être pourvues de ventilations haute et basse dans les mêmes conditions et avec les mêmes sections que la chaufferie. Il est recommandé que le renouvellement d'air soit au minimum de 0,3 fois le volume du silo par heure.

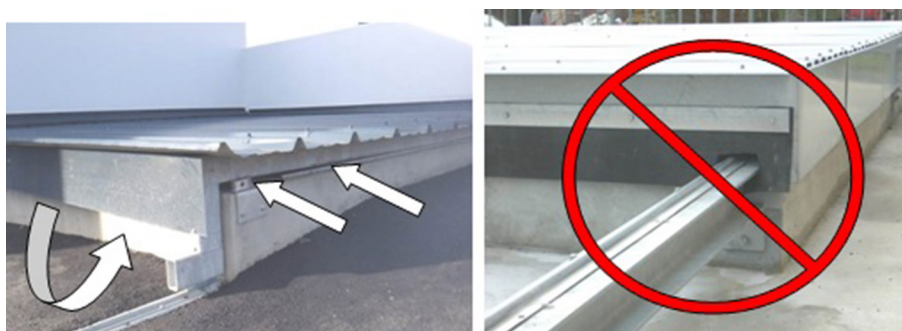
La mise en place d'une ventilation basse dans un silo est en général assez coûteuse et peu efficace notamment lorsque le silo est plein. En effet, après la première livraison de bois dans le silo, la ventilation basse est complètement obstruée par les morceaux de bois et les poussières.

En accord avec le contrôleur technique de l'opération, dans la mesure où il existe une ventilation de la partie haute du silo (naturelle ou forcée), il peut être dérogé au cas par cas à la mise en place d'une ventilation basse et notamment :

- pour les silos enterrés (fosses) ;
- pour les silos de plain-pied livrés par soufflerie.

Plusieurs solutions de ventilation existent en fonction de la conception du silo de stockage :

- **silos enterrés avec trappes coulissantes** : des entrées d'air en partie haute permettent de balayer le haut du stock de bois. Le silo ne doit pas être étanche, il convient donc d'éviter l'installation de « bavettes caoutchouc » ou de « brosses » sur la périphérie du système de couverture. En (Figure 44), sur la photo de gauche, les entrées d'air sont limitées mais réparties sur toute la périphérie du silo. Cela suffit à créer un balayage d'air neuf dans le volume de stockage et à éviter la condensation. Sur la photo de droite, toutes les entrées d'air sont bloquées et le silo est sujet à la condensation. Les bavettes caoutchouc doivent être enlevées.



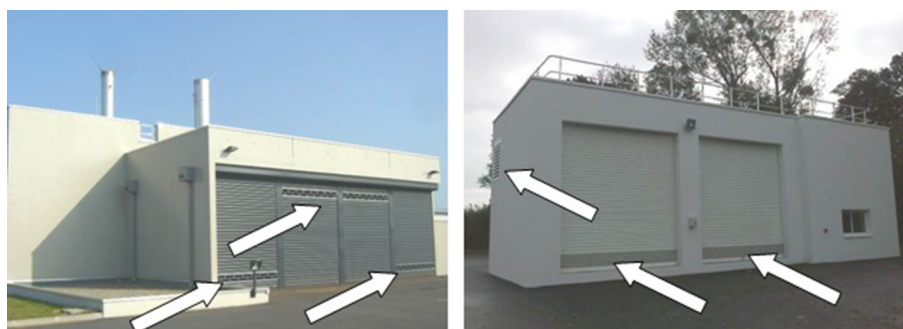
▲ Figure 44 : Silo respectivement avec et sans circulation d'air

- **silos enterrés avec trappes carrossables** : afin de faciliter, voire de forcer, la circulation d'air dans le silo. Si l'intégration architecturale le permet, il convient de privilégier la combinaison de toitures coulissantes et de trappes carrossables. En (Figure 45), le silo n'étant pas étanche à l'air au niveau des panneaux coulissants, un phénomène de condensation important (tâche brunes sur la photo de gauche) s'est produit malgré l'installation d'une extraction d'air (photo de droite).



▲ Figure 45 : Silo à trappes carrossables avec une mauvaise circulation d'air

- **silos enterrés avec portes escamotables** : elles permettent des entrées d'air qui renouvellent l'atmosphère du volume de stockage. En (Figure 46), les entrées d'air sont réparties sur les portes du silo et en partie arrière. Cela suffit à créer un balayage d'air neuf dans le volume supérieur du stockage.



▲ Figure 46 : Silo avec circulation d'air

- **silos aériens remplis par camion souffleur** : ils doivent permettre de garantir le fonctionnement lors des livraisons (étanchéité) et la sécurité pour les personnels intervenant dans le silo (ventilation). La réponse à ces deux exigences contraires demande une attention particulière lors de la conception.

Pour la sécurité des personnes, les silos aériens sont équipés :

- d'un détecteur de CO dans le silo avec renvoi d'alarme lumineuse ou sonore dans la chaufferie ;
- d'un affichage indiquant la possible présence de CO dans le silo et la nécessité d'y intervenir sous la surveillance d'une personne placée à l'extérieur du silo.

Liaison entre le silo et la chaufferie

Le combustible extrait du silo est transféré vers une écluse avant d'entrer dans la chaudière. Le transfert du combustible du silo vers l'entrée de la chaudière peut se faire en direct du silo par l'intermédiaire d'une vis sans fin ou d'un tapis d'extraction de silo.

Si la chaufferie est située au-dessus du silo enterré, une liaison inclinée avec le silo doit être réalisée, notamment par vis sans fin. Dans

ce cas, sa longueur doit être limitée (6 mètres) et son inclinaison ne pas dépasser 40°. En fonction des distances et différences de niveaux entre le silo et la chaudière, il peut être nécessaire d'installer plusieurs vis ou tapis de transfert.



Plus il y a de vis ou de tapis de transfert, plus on augmente le risque de bourrage du combustible. Il est recommandé de ne pas recourir à plus de deux vis ou tapis de transfert.



7

Le circuit hydraulique



On donne dans ce chapitre des exemples types de schémas hydrauliques usuels associés à leurs principes de régulation. Il est abordé notamment la mise en place d'un ballon d'hydroaccumulation ainsi que les schémas de type bi-énergie avec plusieurs chaudières.

7.1. • Les composants hydrauliques et de sécurité

Les composants hydrauliques sont semblables à ceux des installations de chauffage classiques.



Le dimensionnement et la mise en œuvre de ces composants hydrauliques font l'objet d'un guide dans le cadre du programme Règles de l'Art – Grenelle Environnement.

Comme pour les autres combustibles, la mise en sécurité de la chaudière est commandée par l'aquastat de température maximale et par le pressostat en cas de détection d'un manque d'eau. L'installation dispose de sécurités réglementaires pour les surpressions accidentelles (soupapes de décharges thermiques) et les variations du volume d'eau du réseau (vase d'expansion).

Tout générateur doit être protégé par au moins une soupape de sûreté. Elle doit être installée à un endroit accessible, à proximité immédiate de la conduite de départ du générateur. Il ne doit y avoir aucune vanne d'arrêt entre le générateur et la soupape. Elle doit décharger en toute sécurité. Des dispositifs de sécurité doivent être prévus en conséquence comme une tuyauterie de refoulement débouchant vers l'égout à un endroit sûr.



La soupape de sécurité et son raccordement sont orientés vers le sol et, au mieux, vers l'égout.

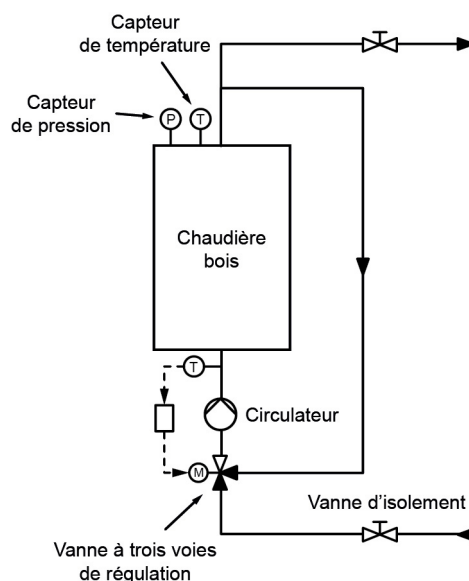
Chaque générateur doit en outre disposer :

- d'un thermomètre ;
- d'un manomètre ;
- un aquastat de température maximale en sortie de chaudière ;
- de vannes à deux voies d'isolement.

Un contrôleur de niveau d'eau, un limiteur bas de pression, un contrôleur de débit ou tout autre dispositif doit être prévu sur les installations pour assurer une protection contre un échauffement excessif des surfaces de chauffe du générateur en cas de manque d'eau.

Tout générateur de puissance utile supérieure à 300 kW doit être muni d'un limiteur de pression.

Il est impératif d'assurer des retours chauds à la chaudière (température d'eau supérieure à 65°C, point de rosée des fumées de combustible bois). Une vanne à trois voies de régulation placée en entrée de chaudière assure le mélange avec de l'eau chaude en provenance de la chaudière pour élever la température de retour (Figure 47).



▲ Figures 47 : Régulation de la température d'eau en entrée de chaudière au bois grâce à une vanne à trois voies en mélange, afin d'assurer des retours à une température suffisamment élevée

7.2. • Le ballon d'hydroaccumulation

Le ballon d'hydroaccumulation constitue une réserve d'eau chaude primaire mise en œuvre entre la chaudière et le circuit de distribution. Il stocke en partie ou toute l'énergie produite par la chaudière afin d'assurer un temps de fonctionnement minimal du générateur. L'énergie ainsi stockée est restituée au chauffage (et éventuellement à l'eau chaude sanitaire) durant les périodes d'arrêt de la chaudière.



Le ballon d'hydroaccumulation assure également le découplage hydraulique entre la production (la chaudière) et la distribution. Il permet aussi le raccordement de la chaudière d'appoint.



Si la fonction de découplage n'est pas assurée par la mise en œuvre du ballon d'hydroaccumulation, elle doit être réalisée par une bouteille de découplage ou un bipasse.

Si un ballon d'hydroaccumulation n'est pas préconisé par le concepteur, il doit justifier son choix en réalisant une étude spécifique démontrant que le ballon n'est pas nécessaire du fait notamment :

- de la possibilité de la chaudière bois de moduler sa puissance en fonction du besoin ;
- de la contenance en eau du réseau de distribution.

Dimensionnement du ballon

La capacité du ballon d'hydroaccumulation peut être déterminée en première approche selon la possibilité de modulation de la chaudière. Ainsi le volume est égal à 45 à 55 litres/kW x facteur de modulation du brûleur. En première approche, un facteur de modulation de 30% peut être considéré. Les spécifications du fabricant doivent être suivies.

Le rapport de la hauteur sur le diamètre du ballon doit être compris entre 1,5 et 3. Il est toutefois recommandé un rapport d'au moins 2,5 pour favoriser la stratification et améliorer la régulation en présence d'un appoint.

Raccordement du ballon en quatre piquages

La (Figure 48) montre le raccordement du ballon d'hydroaccumulation en quatre piquages. Il est placé en parallèle sur l'installation. Cette solution présente l'inconvénient d'induire en permanence une traversée du ballon pour assurer le chauffage.

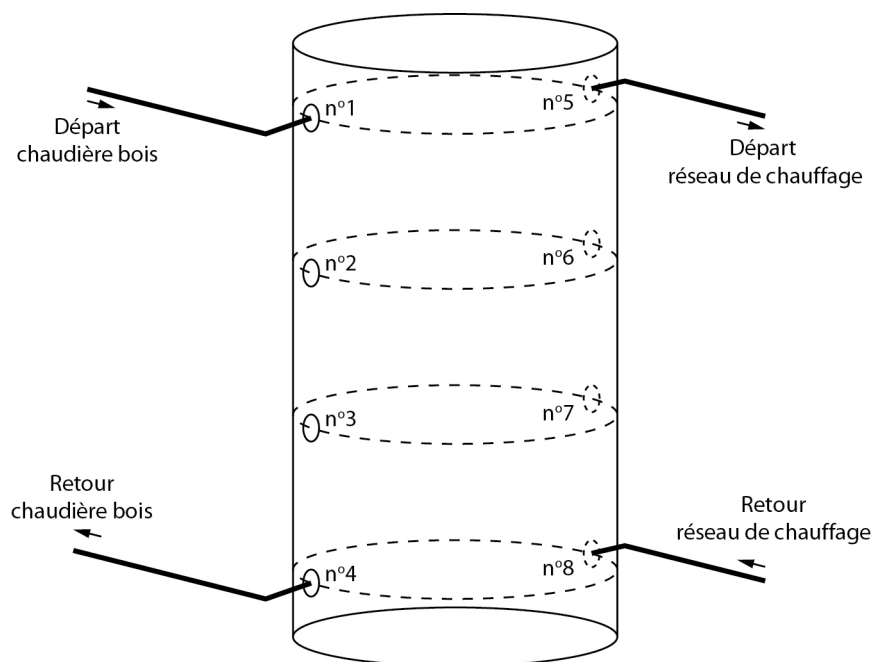
Le ballon d'hydroaccumulation permet d'assurer la décantation des boues en partie basse.

Lors de la phase de charge du ballon, le débit primaire étant plus élevé que le débit secondaire, le débit est descendant dans le ballon. La chaleur s'accumule progressivement de la partie supérieure vers la partie inférieure.

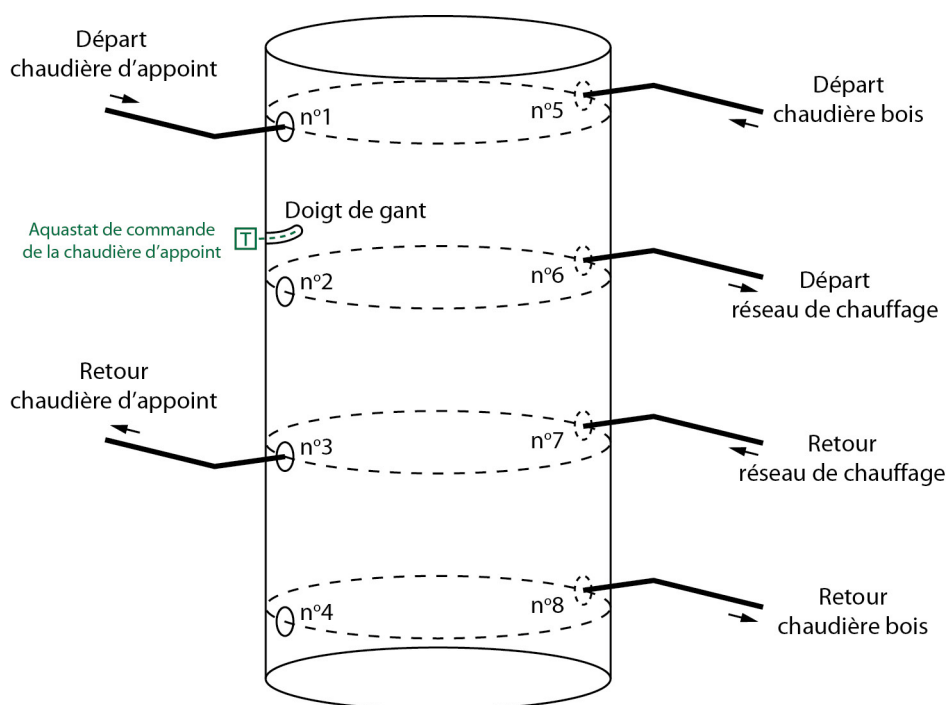
Lorsque la chaudière est à l'arrêt, le débit au primaire s'annule (entre les piquages n°1 et n°4). Le débit dans le ballon est alors ascendant et la chaleur est puisée dans le ballon.

Généralement, le volume « utile » de stockage se situe entre les piquages n°1 et n°4. Le volume inutilisé (« mort ») représente entre 15 et 20% du volume total.

Dans le cas d'une installation avec chaudière d'appoint, celle-ci est par exemple raccordée comme en (Figure 49) aux piquages n°1 et n°3. L'aquastat de commande de la chaudière d'appoint est placé en doigt de gant entre les piquages n°1 et n°2.



▲ Figure 48 : Exemple de raccordement du ballon d'hydroaccumulation en quatre piquages



▲ Figure 49 : Exemple de raccordement d'une chaudière d'appoint sur un ballon d'hydroaccumulation en quatre piquages

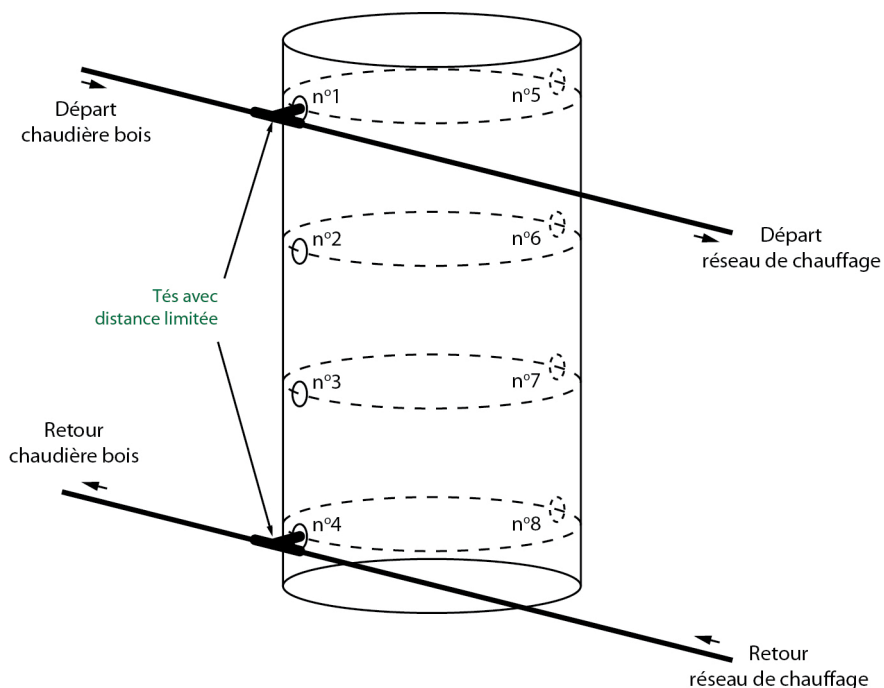
Raccordement du ballon en deux piquages

La (Figure 50) montre le raccordement du ballon d'hydroaccumulation en deux piquages. Il présente l'intérêt de pouvoir utiliser directement la chaleur en provenance de la chaudière vers le réseau secondaire, sans passer par le ballon.



Il est aussi possible de réaliser le raccordement en trois piquages afin de permettre la décantation des boues en partie basse. Les piquages n°1, n°4 et n°8 sont alors utilisés.

Dans le cas d'une installation avec chaudière d'appoint, celle-ci est par exemple raccordée comme en (Figure 51) aux piquages n°5 et n°7. L'aquastat de commande de la chaudière d'appoint est placé en doigt de gant entre les piquages n°5 et n°6.

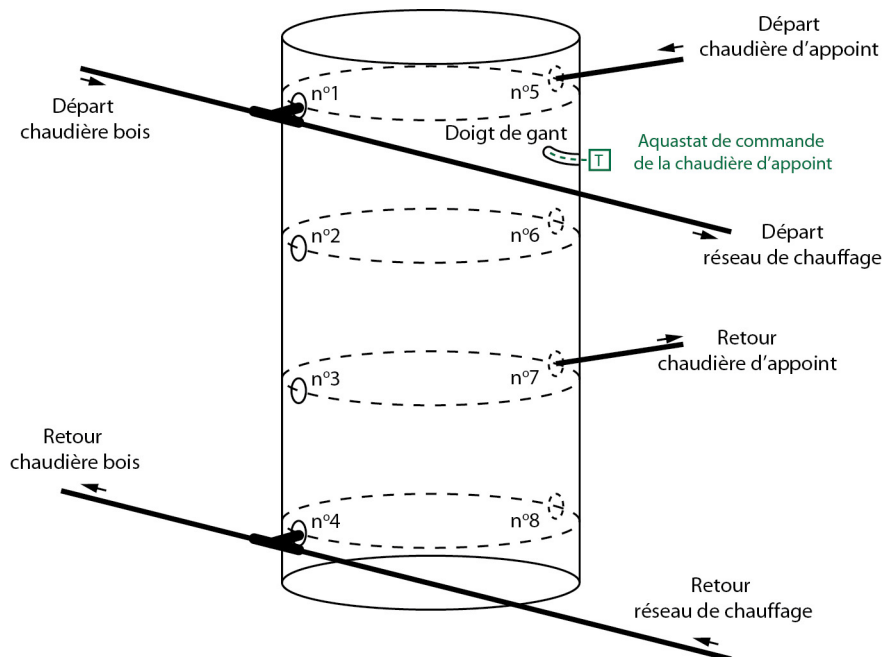


▲ Figure 50 : Exemple de raccordement du ballon d'hydroaccumulation en deux piquages



Pour limiter au maximum l'interaction entre les deux réseaux et assurer le découplage hydraulique, il convient de limiter la distance de piquage des tés vers le ballon et d'augmenter le diamètre des canalisations en ces points

(Figure 50).



▲ Figure 51 : Exemple de raccordement d'une chaudière d'appoint sur un ballon d'hydroaccumulation en deux piquages

7.3. • Exemples de schémas hydrauliques



Avant usage des schémas-types, il revient au lecteur de vérifier s'ils sont applicables vis-à-vis des spécifications techniques de la chaudière au bois, de la chaudière d'appoint éventuelle, du réseau de distribution et de vérifier la cohérence par rapport aux schémas proposés par le fabricant.

Une installation mono-énergie (avec un ou plusieurs générateurs bois) est recommandée pour des installations de puissance inférieure à 200 kW. Pour des puissances supérieures, une installation bi-énergie avec chaudière d'appoint est conseillée.

Un ballon d'hydroaccumulation est recommandé pour les installations :

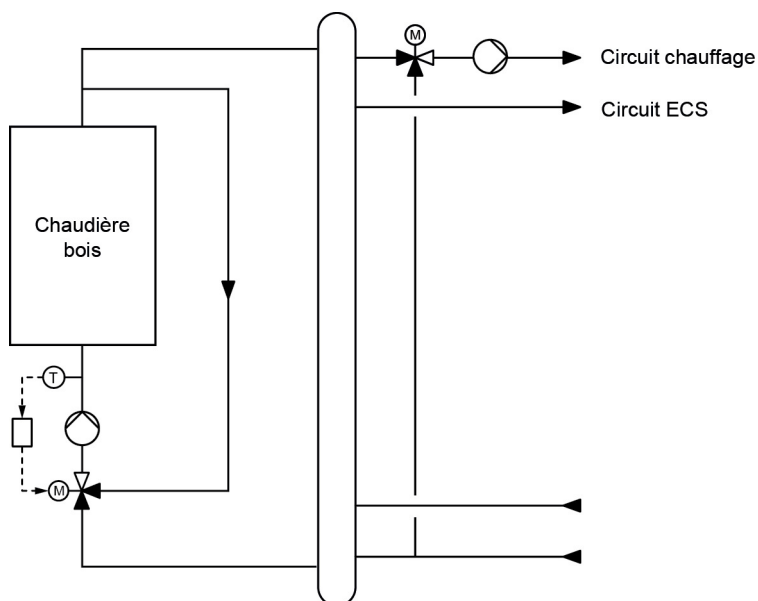
- mono-énergie ;
- dont les besoins de chauffage sont fortement intermittents (école, serre agricole...) ;
- assurant la production d'eau chaude sanitaire en période estivale ;
- dont la puissance d'eau chaude sanitaire est importante par rapport à la puissance de chauffage.

Plusieurs exemples de schémas hydrauliques sont donnés dans ce chapitre. La chaudière bois est toujours équipée d'une vanne à trois voies de régulation permettant d'assurer une température minimale en entrée de chaudière (cf. 7.1).

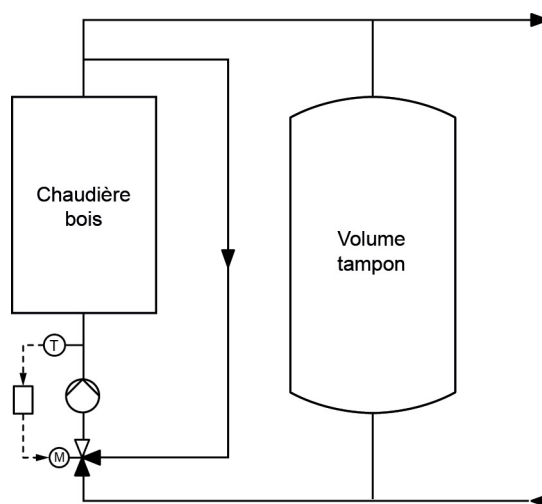
Schémas avec une seule chaudière bois, sans appoint

Quelques exemples selon les caractéristiques de la chaudière et de l'installation de chauffage :

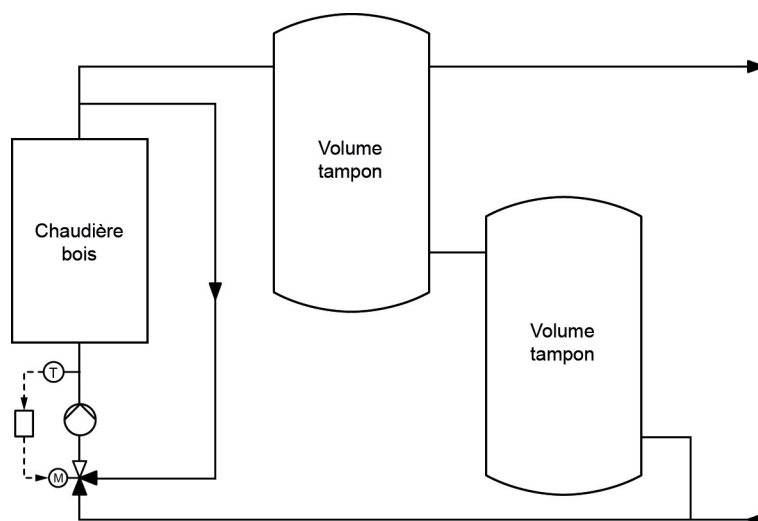
- schéma avec une bouteille de découplage (Figure 52) ;
- schéma avec un ballon d'hydroaccumulation raccordé en deux piquages (Figure 53) ;
- schéma avec deux ballons d'hydroaccumulation (Figure 54) ;



▲ Figure 52 : Exemple d'installation avec une seule chaudière bois avec bouteille de découplage



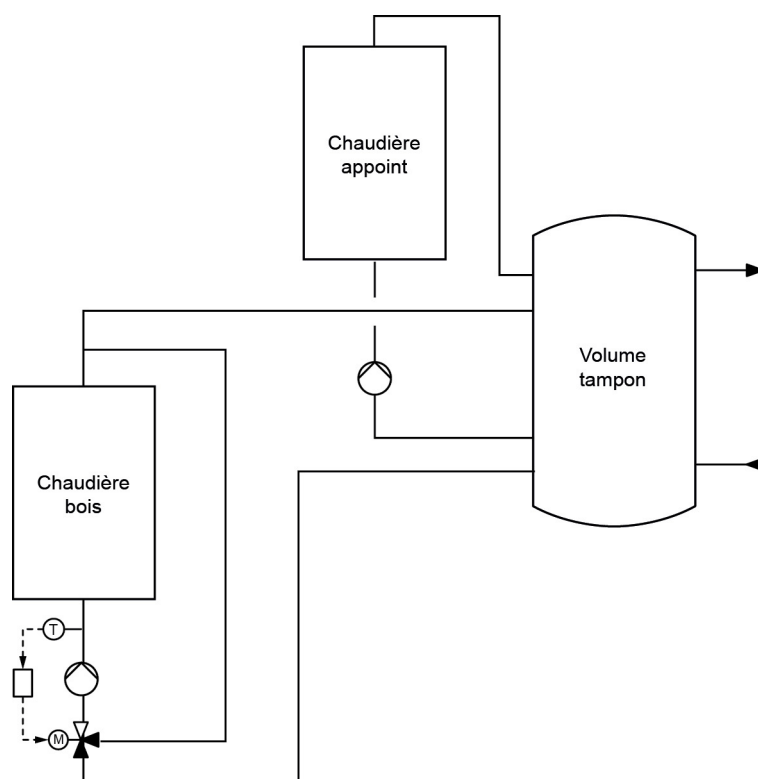
▲ Figure 53 : Exemple d'installation avec une seule chaudière bois raccordée sur un ballon d'hydroaccumulation en deux piquages



▲ Figure 54 : Exemple d'installation avec une seule chaudière bois raccordée sur plusieurs ballons d'hydroaccumulation

Schéma avec une chaudière bois et une chaudière d'appoint

Le schéma de la (Figure 55) montre l'exemple d'une chaudière bois et d'une chaudière d'appoint raccordées sur un ballon d'hydroaccumulation à quatre piquages. Il est à conseiller pour des puissances supérieures à 200 kW.



▲ Figure 55 : Exemple d'installation avec une chaudière bois et une chaudière d'appoint raccordées sur un ballon d'hydroaccumulation en quatre piquages





Schémas avec plusieurs chaudières bois en séquence (cas des chaudières automatiques fonctionnant aux granulés)

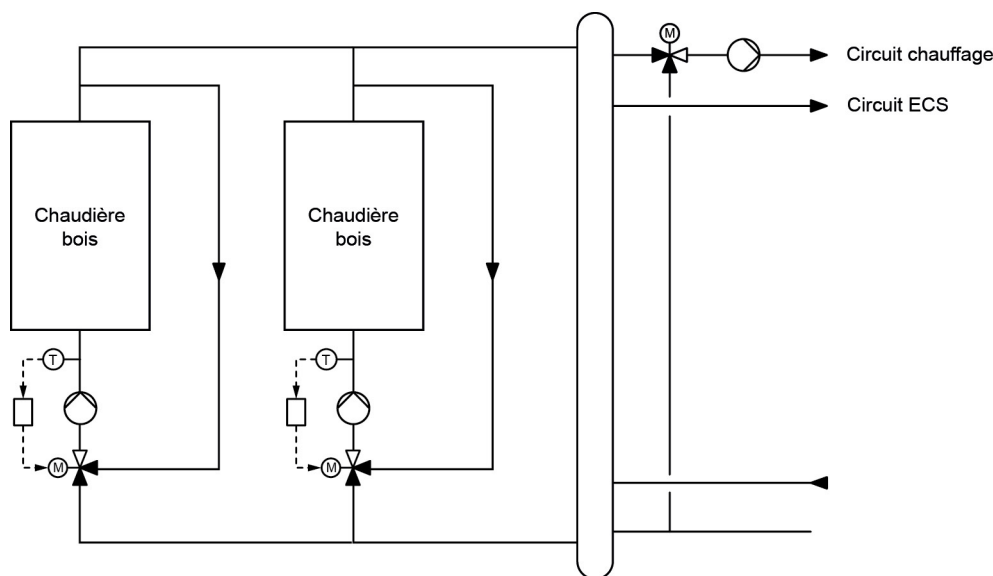
La fonction de mise en séquence des chaudières aussi désignée « cascade » consiste à interdire le fonctionnement de certains générateurs selon les besoins. La sélection du nombre de chaudières à mettre en fonctionnement est généralement réalisée en fonction de la température d'eau, soit à l'entrée des générateurs, soit à leur départ.

Une commutation automatique d'un générateur sur un autre en cas de défaut est généralement réalisée. Il existe également une possibilité de permutation des priorités dans le but d'équilibrer les temps de fonctionnement des générateurs le long de la saison.

La mise en séquence des chaudières peut nécessiter des équipements complémentaires selon la configuration du circuit hydraulique. Ainsi, une interruption du débit dans le générateur qui n'est pas autorisé à fonctionner est indispensable pour annuler les pertes de chaleur et améliorer le rendement. Dans l'exemple de la (Figure 56), le circuit comporte un circulateur en série avec chaque chaudière, l'interruption du débit est assurée par l'arrêt du circulateur et par un clapet anti-retour (non représenté sur le schéma).

Dans certains cas, des vannes d'isolement motorisées sont nécessaires. Des modèles dont la vitesse de déplacement est lente permettent d'assurer une temporisation à l'arrêt du générateur.

Des détecteurs de débit peuvent être placés en série avec chaque générateur dans un but de sécurité afin de n'autoriser le fonctionnement d'un générateur que s'il est irrigué. Des détecteurs à palette sont couramment installés.



▲ Figure 56 : Exemple d'installation avec deux chaudières bois raccordées en parallèle sur une bouteille de découplage, mises en séquence

La régulation



Une chaudière bois intègre plusieurs niveaux de régulation, en complément des automatismes et sécurités décrits en chapitre 9 (cf. 9) :

- régulation de la puissance fournie par la chaudière (taux de charge) ;
- régulation de la combustion par le contrôle de la teneur en oxygènes des fumées ;
- régulation du débit d'extraction des fumées.

8.1. • Régulation du taux de charge de la chaudière

La régulation de la chaudière bois consiste à maintenir constante, à une valeur de consigne, la température de départ de la chaudière.

La consigne peut être modifiée automatiquement en fonction de la température extérieure. Ainsi, en été, une température de départ de 80 à 90°C est suffisante pour la production d'eau chaude sanitaire. La variation de la consigne permet de réduire les consommations de bois par le maintien de températures plus faibles.

La puissance de la chaudière, selon les besoins, peut être commandée :

- en tout ou rien : la chaudière fonctionne à sa puissance maximale en séquences marche/arrêt ;
- par paliers de puissances ;
- par modulation progressive de la puissance.

La régulation en tout ou rien est pénalisante par les instabilités de la température de départ de la chaudière engendrées et par le fonctionnement dans des conditions de rendements faibles et d'émissions de polluants élevées.



La régulation par paliers de puissance est illustrée en (Figure 57).

Le passage d'un seuil de puissance à un autre est commandé en fonction de la température de départ de la chaudière mesurée. Le paramétrage de la loi montre par exemple que lorsque la température descend en dessous de 91°C, la puissance de la chaudière passe de 75 à 100%.

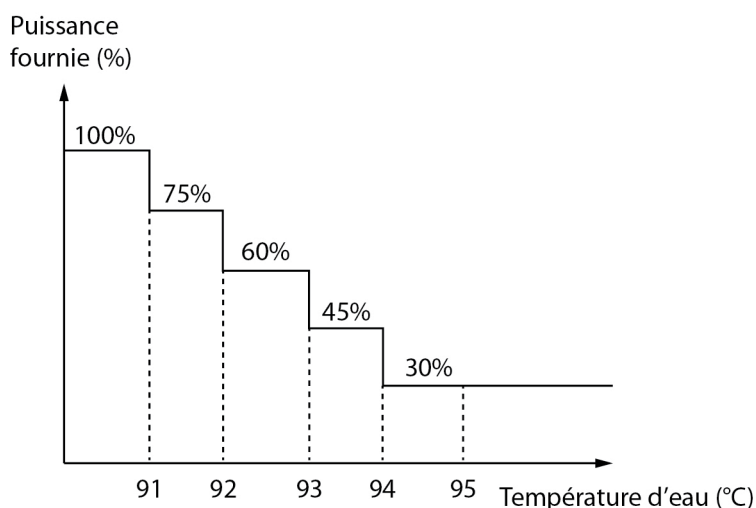
La loi est paramétrée pour un seuil minimal de puissance de 30% car il est difficile d'assurer une combustion satisfaisante pour un taux de charge inférieur.

Cependant, si la température de départ de la chaudière continue à augmenter au-delà de 95°C, la chaudière est mise à l'arrêt par le dispositif de sécurité. La température de consigne de l'aquastat de sécurité doit être plus élevée que la consigne de la régulation (par exemple : 105°C pour une consigne de régulation de 95°C à 30% de puissance) (Figure 57).

Pour chaque seuil de puissance, l'automate agit sur les paramètres suivants :

- vitesse de dégrillage, et éventuellement débit de combustible ;
- débits d'air primaire et secondaire.

La régulation présentée en (Figure 57) est proportionnelle à la température de départ de la chaudière. Elle peut aussi être, sur certains modèles de chaudières, proportionnelle à la vitesse de variation de la température de départ.



▲ Figure 57 : Loi de régulation des paliers de puissance de la chaudière bois en fonction de la température de départ de la chaudière

Commentaire

En absence de besoins, si aucun appel de puissance n'est constaté après un certain délai (temporisation), une dose de bois est introduite dans le foyer pour maintenir la chaudière en veille. La veille peut être remplacée par un système d'allumage automatique.

La régulation par modulation progressive de la puissance est plus récente. La puissance de la chaudière varie en continu grâce à une variation progressive de vitesse et de débits d'air. La température de départ de la chaudière est particulièrement stable. Ce mode de régulation améliore la qualité de la combustion, en particulier pour les combustibles humides.

8.2. • Régulation de la combustion

La combustion doit être caractérisée par :

- un faible taux d'imbrûlés gazeux dans les fumées ;
- des pertes de chaleur sensible minimales.

Malheureusement, ces deux paramètres évoluent de façon opposée en fonction de l'excès d'air de la combustion. Une augmentation de l'excès d'air comburant accroît les pertes par chaleur sensible et diminue les émissions polluantes. Le réglage du mélange air comburant/combustible doit être effectué très précisément de façon à réaliser le meilleur compromis entre ces deux paramètres.

Les variations d'humidité, de climat et les difficultés de maîtrise de la combustion du bois donnent lieu à des dérives importantes du réglage initial. Le rôle de la régulation de la combustion est d'éviter ces dérives qui entraînent une dégradation sensible de la qualité de la combustion.

La régulation de la combustion repose sur le contrôle de la teneur en oxygène sur fumées humides. Il s'agit de la maintenir constante à une valeur de consigne en ajustant le mélange air comburant/combustible. Le dispositif de régulation fait varier le débit d'air secondaire. Ainsi :

- lorsque la teneur en oxygène est supérieure à la consigne, l'excès d'air est trop élevé et la régulation engendre la fermeture des registres d'air secondaire ;
- lorsque la teneur en oxygène est inférieure à la consigne, la régulation ouvre les registres d'air secondaire pour compenser le manque d'air.

La teneur en oxygène des fumées humides est couramment mesurée par une sonde au zirconium.

Détermination de la consigne de teneur en oxygène des fumées humides

La consigne de régulation de la combustion correspond à la teneur en oxygène sur fumées humides déterminée à partir du réglage initial du mélange air comburant/combustible. Il est effectué pour l'humidité maximale du bois utilisé. L'excès d'air choisi pour un combustible humide est le plus souvent de 70% mais repose surtout sur l'expérience et sur des essais.



A partir de l'excès d'air (noté e et exprimé en %), la teneur en oxygène sur fumées sèches (noté O_2 et exprimée en %) est calculée par la formule :

$$O_2 = (21 \times e)/(100 + e)$$

La teneur en oxygène sur fumées humides est ensuite lue sur le graphe de la (Figure 58) à partir de :

- la teneur en oxygène sur fumées sèches ;
- de l'humidité maximale du bois combustible.

La (Figure 58) donne des exemples pour plusieurs types de combustibles : granulés, plaquettes sèches et humides (couleur verte dans l'exemple).

Prenons l'exemple d'une chaudière bois automatique pour déchets de scierie dont le combustible est constitué d'un mélange d'écorces et de sciure d'une humidité de 20 à 60%.

Si l'on considère une humidité maximale de 60% avec 70% excès d'air, la teneur en oxygène sur fumées sèches est calculée selon la formule précédente. Soit $(21 \times 70)/(100 + 70) = 8,6\%$.

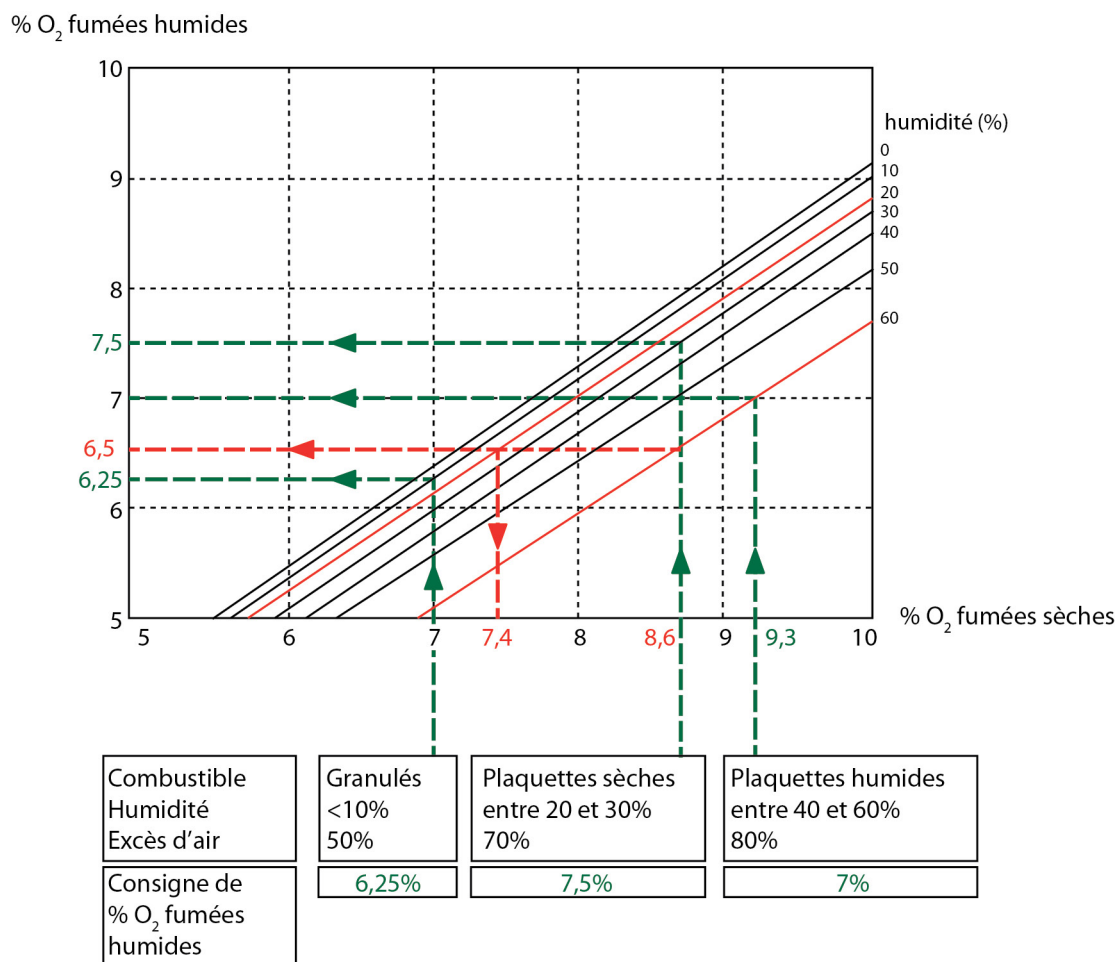
La (Figure 58) permet de déterminer la teneur en oxygène sur fumées humides soit 6,5% en considérant une humidité de 60% et une teneur en oxygène sur fumées sèches de 8,6%. La consigne est donc de 6,5% (couleur rouge dans l'exemple).

Si l'humidité est minimale, de 20%, la teneur en oxygène sur fumées sèches lue sur le graphe, pour une teneur en oxygène sur fumées humides de 6,5%, est de 7,4% (couleur rouge dans l'exemple). L'excès d'air correspondant est alors de 54%. Il est calculé par la formule inverse :

$$e = (100 \times O_2)/(21 - O_2)$$

Ainsi, pour une consigne de teneur en oxygène sur fumées humides de 6,5%, l'excès d'air varie de 54 à 70% selon l'humidité du combustible.

Le rôle de la régulation est de maintenir le point représentatif de la combustion sur le segment horizontal de la (Figure 58) délimité par les humidités maximale et minimale du combustible utilisé.



▲ Figure 58 : Détermination de la teneur en oxygène sur fumées humides de consigne de la régulation à partir de la teneur sur fumées sèches et de l'humidité

8.3. • Régulation du débit d'extraction des fumées

Le débit d'extraction des fumées est régulé en fonction de la dépression au foyer. Cette dépression est une donnée du fabricant. Le contrôle de la dépression au foyer est important. Il permet :

- de maintenir un tirage constant dans le conduit de fumée et d'éviter ainsi les retours de fumée dans la chaufferie ;
- d'assurer une bonne alimentation en air et un bon mélange avec le combustible. La combustion est meilleure et plus propre.

La dépression au foyer dépend de plusieurs paramètres dont notamment la température, l'humidité extérieure et la charge de bois dans le foyer. Il existe deux techniques de réglage de la dépression :

- par ventilateur d'extraction à vitesse variable ;
- par registre d'air dans le conduit d'extraction.

La majorité des fabricants adopte une régulation du débit d'extraction des fumées par variation de vitesse du ventilateur. Lors d'une augmentation de la dépression au foyer, la vitesse du ventilateur doit être réduite.



D'une manière générale, la plupart des systèmes d'épuration sont équipés de filtres multicyclones (cf. 10.8). Ils sont déterminés pour un débit de fumée nominal, une concentration et un type de poussière. Les variations du débit d'extraction réduisent considérablement l'efficacité des filtres.

Il est donc conseillé de faire fonctionner le ventilateur à vitesse constante et de réguler la dépression au foyer en assurant un recyclage d'une partie des fumées dans le dépoussiéreur. Le recyclage est obtenu par l'intermédiaire d'un conduit bippassant le filtre multicyclone et d'un registre motorisé.

La position du registre est régulée par la dépression dans le foyer. Une augmentation de la dépression entraîne la fermeture partielle du registre et donc le recyclage d'une partie des fumées dans le dépoussiéreur.

Le ventilateur doit absolument être dimensionné pour les conditions les plus défavorables correspondant au tirage minimum (température extérieure de 30°C) afin d'éviter toutes dérives du système en cas de diminution de la dépression au foyer.

Commentaire

Les fumées provenant de la combustion du bois étant chargées en particules, il y a lieu de prévoir un accès aisé pour le nettoyage des équipements (nettoyage recommandé tous les semestres)

Les automatismes et sécurités

9



En complément de la régulation (cf. 8), l'armoire de commande de la chaudière bois assure également les fonctions de :

- commande des automatismes permettant le fonctionnement de l'ensemble de la chaîne d'alimentation (dessilleur, convoyeur, introduction dans le foyer) ;
- gestion des sécurités pour prévenir les dysfonctionnements éventuels de l'installation (sécurités relatives à l'alimentation et l'interface alimentation/foyer, à la combustion et à l'échange de chaleur, à la partie hydraulique de l'installation).

9.1. • La commande des automatismes

Le fonctionnement de la chaîne d'alimentation (dessilleur, transfert et introduction du combustible) est géré automatiquement en fonction des besoins de chauffage :

- l'alimentation du foyer, la mise en route de l'extracteur des fumées et les ventilateurs d'air comburant sont commandés en fonction de la température de départ de la chaudière ;
- les systèmes de dessilage et de transfert du combustible sont généralement commandés par des capteurs de niveau ;
- le système de décendrage est commandé automatiquement selon un cycle temporisé. Le mouvement du décendrage est assuré selon une périodicité (délai entre les mouvements) et une durée de mouvement fixées. Dans le cas d'un décendrage humide, un capteur de niveau d'eau permet de commander le remplissage automatique. Un second capteur de niveau bas déclenche un défaut.



9.2. • Les sécurités

Les dysfonctionnements possibles de l'installation doivent être détectés et la mise en sécurité de l'installation commandée par :

- l'aquastat de sécurité au départ de la chaudière bois et par le pressostat en cas de détection d'un manque d'eau dans l'installation ;
- une vanne thermostatique couplée à un serpentin de décharge permettant de refroidir l'installation en cas de surchauffe ;
- une sonde placée dans le foyer contrôlant le niveau de température et arrêtant l'installation en cas de température trop basse (défaut d'alimentation en combustible par exemple) ou trop haute (alimentation en combustible trop sec par exemple) ;
- un déprimomètre placé en sortie de foyer de la chaudière garantissant une dépression de ce dernier ;
- une mesure de la température des fumées permettant de détecter un défaut sur l'alimentation et le système d'introduction du combustible (bouillage de combustible dans le cas d'une vis sans fin notamment). Une sonde thermostatique, indépendante du système de gestion, est placée en entrée du système d'introduction de combustible et permet de déclencher un arrosage en cas d'élévation de température.

L'évacuation des produits de combustion

10



Rappelons que lors d'une rénovation, le conduit de fumée doit faire l'objet d'un diagnostic (contrôle de vacuité et d'étanchéité). Ce diagnostic est décrit dans l'annexe C de la norme NF DTU 24.1 P1.

10.1. • Matériaux

Les conduits et carnaux de fumée peuvent être réalisés en différents matériaux tels que terre cuite, briques réfractaires, béton, métal ou céramique. Leurs mises en œuvre sont traitées dans les règles existantes (Figure 59).

Type de conduit de fumée	Références
Conduit de fumée – général	NF EN 15287-1
Conduit de fumée en terre cuite et briques	NF DTU 24.1 P1 + A1 (P8)
Conduit de fumée en béton	NF DTU 24.1 P1 + A1 (P9)
Conduit de fumée métallique – simple paroi et isolé	NF DTU 24.1 P1 + A1 (P10)
Conduit de fumée tubé	NF DTU 24.1 P1 + A1 (P15)
Autre procédé non traditionnel (isolation de tubage flexible, résine thermodurcissable, céramique...)	Avis Technique et Document Technique d'Application

▲ Figure 59 : Règles de mise en œuvre des conduits de fumée

La mise en œuvre des conduits de raccordement est traitée dans la partie 13 de la norme NF DTU 24.1 P1 et celle des carnaux dans la partie 12.





Les mortiers utilisés pour la réalisation des joints entre boisseaux des conduits maçonnés sont précisés dans la norme NF DTU 24.1 P1, en particulier en annexe E concernant les dosages des constituants (liant, sable, eau).

Les procédés et techniques hors du domaine d'application de la norme NF DTU 24.1 (comme les conduits avec un revêtement en céramique) sont traités dans les spécifications techniques de ces produits et les Avis Techniques ou Documents Techniques d'Application.

10.2. • Plaque signalétique

Le conduit de fumée doit disposer d'au moins une plaque signalétique indiquant les informations nécessaires à son identification conformément à la norme NF DTU 24.1 et aux spécifications fournies par le fabricant des composants conduit de fumée.

Cette plaque doit être apposée, par l'installateur du conduit de fumée, en pied de conduit au niveau du raccordement du carneau ou du conduit de raccordement. Un moyen d'écriture indélébile est utilisé (le matériau utilisé pour la plaque est inaltérable).

Cette plaque informe sur les performances de l'ouvrage de conduit de fumée. Elle doit comporter :

- la désignation de l'ouvrage ;
- la désignation des composants utilisés ;
- l'identification de l'installateur ;
- l'identification du ou des fabricants ;
- la date de l'installation ;
- le texte « Le conduit doit être entretenu selon la réglementation en vigueur ».

Désignation normative des composants de l'ouvrage (selon NF EN 1443)	Exemple : T450 N1 D 3 G 80
Installateur du conduit : Coordonnées : Tél : Raison sociale :	Marque et modèle du ou des fabricants des composants (dont dimensions) :
Date de l'installation :	
« Le conduit doit être entretenu selon la réglementation en vigueur »	

▲ Figure 60 : Informations minimales obligatoires d'une plaque signalétique d'un conduit de fumée

La nomenclature de désignation des conduits selon la norme NF EN 1443 est la suivante à partir d'une désignation « standard » :

Txxx N1 D 3 G 80

- **Txxx** désigne la classe de température (en °C), par exemple 450°C. Elle doit être au moins égale à la température des fumées à la buse déclarée par le fabricant de la chaudière ;

- **N1** désigne la classe de pression d'utilisation du conduit. Les conduits sont de classe N : pression négative – tirage naturel ;
- **D** désigne la classe de résistance à la condensation. Elle peut être de classe « sèche » désignée par la lettre D (conduit fonctionnant sans condensation) ou de classe « humide » désignée par la lettre W (conduit fonctionnant avec condensation) ;
- **3** désigne la classe de résistance à la corrosion. Ce classement dépend du type de matériau utilisé. On vérifie que le combustible bois est indiqué par le fabricant ;
- **G** désigne la classe de résistance au feu de cheminée. Elle doit obligatoirement être de classe résistant au feu de cheminée pour le bois soit G ;
- **80** désigne la distance de sécurité en mm donnée par le fabricant.

10.3. • Implantation

L'arrêté du 23 juin 1978 définit l'implantation du conduit selon la puissance utile totale de la chaufferie :

- si la puissance est inférieure ou égale à 300 kW, le conduit peut être intérieur ou extérieur ;
- si la puissance est supérieure à 300 kW, le conduit doit être extérieur.

Les conduits situés à l'intérieur ne doivent pas se trouver en surpression en régime nominal. Ils doivent être mis en dépression, soit par tirage naturel, soit par un dispositif mécanique.

Il y a lieu de prévoir une protection du conduit de fumée contre les risques de chocs et de brûlures dans les zones accessibles, en situation extérieure au bâtiment.



Si la puissance utile totale dépasse 300 kW, il est autorisé un passage du conduit de fumée à l'intérieur du bâtiment sous réserve que ce conduit soit désolidarisé du bâti et placé dans une gaine maçonnée visitable, coupe-feu et ventilation du tubage par l'extérieur (selon conditions du NF DTU 24.1 P1 – Travaux de fumisterie).



10.4. • Raccordement des générateurs au conduit de fumée

Les spécifications de raccordement des générateurs au conduit sont données par :

- la norme NF DTU 24.1 (Travaux de fumisterie) ;
- le Règlement Sanitaire Départemental Type (RSDT).

Le raccordement de plusieurs générateurs à un conduit de fumée unique n'est autorisé que si le conduit est compatible avec les différents produits de combustion et s'il est dimensionné en conséquence.

Peuvent être raccordés sur un même conduit individuel, sous certaines conditions, des générateurs à combustibles solides et des générateurs à combustibles liquides ou gazeux.

Commentaire

Les chaudières peuvent être raccordées ou non au conduit de fumée unique par un tronçon commun appelé carneau. La mise en œuvre des carneaux est décrite dans la norme NF DTU 24.1 P1 au chapitre 12.

Des appareils à combustible solide (à l'exception des âtres, appareils à foyers ouverts, inserts, poêles, cuisinières) peuvent être raccordés à un conduit de fumée unique. Ce conduit doit généralement être indépendant du (ou des) conduit(s) individuel(s) desservant des foyers à combustibles liquides ou gazeux, sauf si :

- pour une puissance utile totale inférieure à 70 kW dans le cas de combustible solide : l'accouplement des deux appareils (l'un à combustible liquide ou gazeux et l'autre à combustible solide) est réalisé par un équipement fourni par un fabricant et ayant été reconnu apte à l'emploi par un Avis Technique ou un Document Technique d'Application. Cet équipement doit interdire le fonctionnement simultané des deux appareils ;
- pour une puissance utile totale supérieure à 70 kW dans le cas de combustible solide : le conduit est compatible avec les produits de la combustion de chaque combustible et les prescriptions suivantes sont respectées dans toutes les conditions de fonctionnement :
 - la section du conduit d'évacuation est vérifiée conformément aux normes NF EN 13384-1 et NF EN 13384-2 ;
 - le débouché des conduits desservant un (ou des) appareil(s) doit être configuré de manière à obtenir la vitesse minimale d'éjection des gaz répondant aux prescriptions relatives à la lutte contre la pollution atmosphérique.

10.5. • Dimensionnement du conduit de fumée

Le conduit de fumée doit permettre :

- d'évacuer à l'extérieur les produits résultant de la combustion ;
- d'assurer le tirage naturel nécessaire au fonctionnement des générateurs.

Pour cela, le dimensionnement du conduit (section et hauteur) doit être correctement réalisé et vérifié conformément aux normes NF EN 13384-1 (conduit raccordé à un seul appareil) et NF EN 13384-2 (conduit raccordé à plusieurs appareils). Des logiciels de calcul utilisant les algorithmes de ces normes sont disponibles.

Dans tous les cas, le dimensionnement du conduit de fumée réalisé selon les normes doit prendre en compte les réglementations en vigueur portant sur les obstacles avoisinants et la vitesse minimale d'éjection notamment.

10.6. • Dispositions destinées à limiter la pollution atmosphérique

Les caractéristiques de construction et d'équipement des chaufferies doivent permettre une bonne diffusion des gaz de combustion de façon à ne pas engendrer dans les zones accessibles à la population une teneur en produits polluants résultant de la combustion, et notamment en dioxyde de soufre, susceptible de dépasser les teneurs limites admissibles.

Elles sont déterminées d'une part en fonction de la puissance des équipements thermiques et de la nature du combustible, d'autre part en fonction de l'existence d'obstacles susceptibles de gêner la dispersion des gaz de combustion.

Les fumées doivent être rejetées :

- à une vitesse minimale d'éjection ;
- à une hauteur minimale par rapport au sol.

Commentaire

Pour des installations de puissance fournie supérieure à 2 MW, se référer à l'arrêté du 25 juillet 1997 modifié relatif aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration.

Les textes applicables pour déterminer la hauteur du conduit de fumée sont donnés en (Figure 61). Ceux applicables pour déterminer la vitesse d'éjection sont en (Figure 62).



Usage chaudière	Critère de puissance cumulée		Textes de références	Rubrique ICPE	S'applique à une installation :	
	Puissance utile	Puissance de combustion sur PCI			Neuve	Ou avec permis de construire depuis le :
Classique (*)	< 70 kW	-	Arrêté du 22-10-1969	-	Oui	1 ^{er} janvier 1970
	≥ 70 kW	< 2MW	Arrêté du 22-10-1969 et arrêté du 20-06-1975 (abrogé) (**)	-		1 ^{er} janvier 1970
Autre ICPE sous autorisation	-	< 2MW	Arrêté du 02-02-1998	(+) Autre que 2910		1 ^{er} janvier 1999
Tout type	-	> 2MW < 20MW	Arrêté du 25-07-1997 (« PIC »)	2910-A		1 ^{er} janvier 1998

(*) usage dit classique : chauffage habitat, tertiaire... pour une installation n'appartenant pas à une rubrique ICPE (type soumise à autorisation)

(+) : hors installations listées dans l'article 1^{er} de l'arrêté du 02-02-1998 (Raffinerie, carrières, cimenteries, papeterie, verreries, installations de traitement ou stockage ou transit de résidus urbains ou de déchets industriels, élevage, atelier traitement de surface et incinérateur d'animaux de compagnie)

(**) : usage de cet arrêté uniquement recommandé, car abrogé

▲ Figure 61 : Textes applicables pour déterminer la hauteur du conduit de fumée d'une chaufferie bois, selon la puissance cumulée



Usage chaudière (destination du chauffage)	Critère de puissance cumulée		Textes de références	Rubrique ICPE	S'applique à une installation :	
	Puissance utile	Puissance de combustion sur PCI			Puissance utile	Puissance de combustion sur PCI
Classique (*)	< 70 kW	-	Absence de texte réglementaire, Sauf NF DTU 24.1 (***)	-	-	-
	≥ 70 kW	< 2MW	Arrêté du 20-06-1975 (abrogé) (**)	-	-	-
Autre ICPE sous autorisation	-	< 2MW	Arrêté du 02-02-1998	(+) Autre que 2910	Oui	1 ^{er} janvier 1999
Tout type	-	> 2MW < 20MW	Arrêté du 25-07-1997 (« PIC »)	2910-A		1 ^{er} janvier 1998

(*) usage dit classique : chauffage habitat, tertiaire... pour une installation n'appartenant pas à une rubrique ICPE (type soumise à autorisation)

(+) : hors installations listées dans l'article 1^{er} de l'arrêté du 02-02-1998 (Raffinerie, carrières, cimenteries, papeterie, verreries, installations de traitement ou stockage ou transit de résidus urbains ou de déchets industriels, élevage, atelier traitement de surface et incinérateur d'animaux de compagnie)

(**) : usage de cet arrêté uniquement recommandé, car abrogé

(***) : exigence du NF DTU 24.1 P1 pour une éjection verticale des fumées dès que la puissance utile est supérieure à 70kW (chaufferie) et que le combustible est solide (biomasse, charbon...)

▲ Figure 62 : Textes applicables pour déterminer la vitesse d'éjection du conduit de fumée d'une chaufferie bois, selon la puissance cumulée

10.7. • Seuils réglementaires de rejets

Valeurs limites de rejet applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n°2910 (2<P<20 MW)

L'arrêté du 26 août 2013, modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n°2910 (Combustion), impose de nouvelles valeurs limites d'émission. Les valeurs limites pour les poussières sont données (Figure 63).



La puissance thermique considérée est la somme des puissances des chaudières bois et des chaudières d'appoint installées.



Poussières (mg/Nm ³)			
	Jusqu'au 31 décembre 2017		A partir du 1 ^{er} janvier 2018
	Installation déclarée avant le 1 ^{er} janvier 2014	Installation déclarée après le 1 ^{er} janvier 2014	
2 < P < 4 MW	225	50	50
4 < P < 20 MW	150*,75**	50	

* Installation déclarée avant le 1^{er} janvier 2014, sauf si la puissance dépasse 10 MW et qu'elle est située dans une agglomération de plus de 250 000 habitants visée dans la liste figurant à l'article R. 221-2 du Code de l'environnement. Cette valeur s'applique jusqu'au 31 décembre 2017.

** Installation déclarée avant le 1^{er} janvier 2014, si la puissance dépasse 10 MW et qu'elle est située dans une agglomération de plus de 250 000 habitants visée dans la liste figurant à l'article R. 221-2 du Code de l'environnement. Cette valeur s'applique jusqu'au 31 décembre 2017.

▲ Figure 63 : Valeurs limites de rejets de poussières selon la puissance

Valeurs limites de rejet applicables aux installations non classées (P<2 MW)

Pour les chaufferies de puissance thermique inférieure à 2 MW, il n'existe pas de réglementation de valeur limite de rejet.

Il est recommandé de retenir la valeur limite réglementaire de rejet de poussières applicable aux chaufferies de puissance thermique comprise entre 2 et 4 MW, à savoir :

- pour les installations déclarées avant le 1^{er} janvier 2014 (et ce jusqu'au 31 décembre 2017) : 225 mg/Nm³ ;
- pour les installations déclarées après le 1^{er} janvier 2014 : 50 mg/Nm³.

10.8. • Les solutions pour le traitement des fumées

Les trois techniques les plus couramment utilisées pour le traitement des fumées dans les chaufferies bois sont :

- le multicyclone ;
- le filtre à manches ;
- l'électrofiltre.

Commentaire

La technologie de traitement des fumées par voie humide (type laveurs) n'est pas utilisée dans le domaine des chaufferies bois en raison de la consommation d'eau excessive et de la nécessité du traitement des eaux de lavage et des boues résiduelles.

Le filtre multicyclone

Le multicyclone utilise la force centrifuge pour capter les poussières. Les fumées issues de la chaudière à bois entrent dans le multicyclone d'une manière tangentielle et sont soumises à un mouvement de

rotation. Les particules ou poussières, sous l'effet de la force centrifuge, sont projetées sur les parois et tombent en partie basse du système pour être ensuite collectées.

Le multicyclone est généralement intégré dans la chaudière.

L'efficacité du multicyclone dépend de la taille des particules mais il ne permet pas de séparer les particules les plus fines (celles inférieures à 2 μm). Elle est d'environ 98,5% pour des particules de 20 μm et seulement de 65% pour des particules de 10 μm .

Les dimensions des poussières dépendent de la granulométrie du combustible utilisé. L'exploitant de la chaudière bois doit porter une attention particulière aux performances garanties par le fabricant du multicyclone dans le cas où le combustible majoritaire est de la sciure de bois.



Le seuil de performance garanti des multicyclones est généralement de 150 mg/Nm³.

Le filtre à manches

Dans un filtre à manches, les fumées chargées de particules entrent d'abord dans un caisson de détention qui permet l'élimination des plus grosses poussières avant de passer au travers de manches de filtration. Les poussières s'accumulent sur le média filtrant. Le décolmatage des particules est, généralement, effectué par injection d'air comprimé à l'intérieur des manches. Les particules sont ensuite collectées dans une (ou plusieurs) trémie(s) située(s) à la base du filtre.

Commentaire

Le coût d'un filtre à manches dépend du nombre de manches. Il varie donc selon la puissance de la chaudière.

Le type de manche de filtration est choisi en fonction de la température des fumées :

- de 120 à 150°C : manches en PTFE (polytétrafluoroéthylène) ;
- de 150 à 250°C : manches en fibre de verre pour limiter les risques d'incendie ;
- en dessous de 120°C et au-dessus de 250°C : les filtres à manches sont bipassés.

De précautions spécifiques doivent être prises sur ce type d'installation pour éviter les risques d'incendie. Un système de détection et d'extinction incendie doit être mis en place. Il apparaît sur le marché des filtres à média métallique permettant une plus grande gamme de température.

Les seuils de performance garantis peuvent être de 10, 30 ou 50 mg/Nm³. Ils varient en fonction de la nature du combustible, de la demande du maître d'ouvrage ainsi que des moyens financiers



disponibles. La performance attendue de l'équipement a une incidence sur le coût, variable selon sa taille, le nombre de manches et la technologie choisie. L'efficacité de filtration ne change pas avec la concentration en poussières.



Le seuil de performance garanti des filtres à manches peut atteindre 10 mg/Nm³ pour les équipements les plus performants.

Commentaire

La durée de vie des manches est approximativement de 3 ans. Leur changement peut nécessiter jusqu'à deux jours d'intervention et requiert un personnel qualifié.

L'électrofiltre

L'électrofiltre est un mode de dépoussiérage par séparation électrique qui consiste à faire passer les gaz de combustion entre deux électrodes. L'intérieur du filtre est compartimenté au moyen de plaques métalliques régulièrement espacées dans le sens d'écoulement des fumées, reliées à la masse et entre lesquelles se trouvent des fils tendus ou des barres, reliés à une source électrique continue.

Le champ électrique qui en résulte exerce sur les poussières chargées électriquement une force qui les précipite sur les plaques réceptrices et les fait tomber dans une trémie d'où elles sont évacuées. Celles qui adhèrent aux plaques sont décollées par un frappage périodique.

L'efficacité de ce type de filtration diminue si la concentration en particules dans les fumées augmente. Contrairement à un filtre à manches, l'électrofiltre ne permet pas de garantir un seuil de rejet quelle que soit la biomasse entrante. Le combustible doit être du bois uniquement.

Les seuils de performance garantis peuvent être de 30, 50 ou 100 mg/Nm³. Ils varient en fonction de la nature du combustible, de la demande du maître d'ouvrage ainsi que des moyens financiers disponibles. La performance attendue de l'équipement a une incidence sur son coût, variable avec sa taille.



Le seuil de performance garanti des électrofiltres peut atteindre 20 mg/Nm³ pour les équipements les plus performants.

Bilan

Le traitement des poussières par multicyclone est largement utilisé et permet de respecter des seuils de performance de 150 mg/Nm³.

Les techniques de dépoussiérage par filtres à manches et électrofiltres sont utilisées pour des chaufferies où la réglementation fixe une

valeur limite de rejet de poussières plus faible, qui ne peut pas être garantie par un multicyclone.

En regard des réglementations de plus en plus restrictives, un traitement des poussières par multicyclone peut s'avérer rapidement insuffisant.

Commentaire

Le coût des filtres multicyclones est négligeable par rapport aux électrofiltres ou aux filtres à manches. Compte tenu de leur pouvoir de filtration, il est justifié de conserver les multicyclones en sortie de chaudière.

Le choix de recourir à un système de dépoussiérage par filtres à manches ou par électrofiltres résulte d'un compromis entre performances environnementales, contraintes techniques et coûts.

Le filtre à manches peut atteindre de meilleurs niveaux de performance et est d'un coût moins élevé pour un même niveau d'émission de poussières. Le coût d'un électrofiltre est identique quelle que soit la puissance de la chaudière. L'électrofiltre est plus encombrant, mais ne présente pas les mêmes risques incendie que le filtre à manches.



Pour les chaudières de puissance inférieure à 2 MW, l'évaluation environnementale et économique conduit à choisir un filtre à manches plutôt qu'un électrofiltre.



11

Gestion et valorisation des cendres de bois



11.1. • Origine des cendres

La combustion du bois aboutit à deux types de sous-produits solides :

- les cendres sous foyer, qui sont récupérées sous la chaudière et représentent en moyenne 3% du tonnage de bois entrant ;
- les cendres volantes, qui sont issues de la filtration des fumées.

On distingue deux sources de cendres volantes :

- les cendres issues du filtre multicyclone (cf. 10.8) permettant de recueillir les particules les plus grosses et représentant 80 à 90% des flux. Elles sont en général mélangées aux cendres sous foyer ;
- les cendres de dépoussiérage complémentaire (filtre à manches, électrofiltre...) (cf. 10.8), les plus fines, qui représentent 10 à 20% des flux et qui sont collectées et éliminées séparément des autres cendres.

Les caractéristiques physico-chimiques et les voies de valorisation varient selon le type de cendre. Les teneurs en éléments traces métalliques sont d'autant plus importantes que les cendres sont fines. Par conséquent, les cendres de dépoussiérage concentrent les impuretés minérales (éléments traces métalliques) contenues dans le bois naturel et, par précaution, seront éliminées en installation de stockage de déchets dangereux (ISDD). En revanche, les cendres sous foyer disposent d'une composition physico-chimique leur conférant un intérêt agronomique certain. Les éléments développés par la suite font référence aux cendres sous foyer.



11.2. • Caractéristiques physico-chimiques

La composition des cendres est directement liée au combustible et notamment à :

- sa nature (feuillus, résineux, bois exotiques) ;
- son origine (exploitation forestière, produits connexes, bois en fin de vie...) ;
- la localisation géographique du lieu de croissance du bois ;
- son taux d'impuretés (cailloux, terre...), qui est lié à ses modes de production et de stockage.

Par ailleurs, la conception même de la chaufferie a également une incidence sur la composition des cendres (mélange ou non des cendres volantes issues du multicyclone).

On distingue essentiellement trois catégories d'éléments dans les cendres de bois :

- les éléments majeurs et oligoéléments, à l'origine de leur valeur agronomique ;
- les éléments traces métalliques (ETM) et organiques (CTO) ;
- les impuretés macroscopiques.

Les bilans présentés ci-après résultent d'une analyse statistique de plus de 60 prélèvements de cendres sous foyer réalisés sur des chaufferies de Normandie.

Les éléments majeurs et oligoéléments

Ces éléments sont à l'origine de la valeur agronomique et fertilisante des cendres qui s'exprime par les indicateurs suivants :

- la teneur en matière sèche, qui s'élève en moyenne à 69% ;
- le taux d'imbrûlés, qui atteint 10,5% sur brut ;
- la teneur en carbone organique, 0,8% de la matière sèche ;
- la masse volumique des cendres humides, proche de 2 600 kg/m³ ;
- les éléments fertilisants et neutralisants dont les valeurs sont reportés dans le tableau (Figure 64).

Les teneurs en calcium et en potasse des cendres de bois leur confèrent un intérêt agronomique notamment sur les sols ayant un pH faible.

	Teneur en éléments des cendres (kg/tonne brute de cendre brute)				
	Azote	Phosphore	Potassium	Chaux	Magnésium
Moyenne	1	7	23	147	12
Médiane	0	6	20	146	12

▲ Figure 64 : Analyses de paramètres agronomiques des cendres de chaufferies bois



Les éléments traces métalliques

Comme toutes les matières vivantes, le bois contient des éléments minéraux dont certains sont métalliques : il s'agit notamment d'oligoéléments (zinc, cuivre...) captés dans le sol, mais également d'éléments plus toxiques quand ils sont en quantités trop importantes (plomb, arsenic, cadmium...). Lors de la combustion du bois, ces éléments métalliques se concentrent dans les cendres volantes et les cendres sous foyer. Les éléments traces métalliques proviennent également des produits de traitement du bois, des revêtements de surface et des matériaux contenus ou supportés par les emballages en bois ; on les retrouve de ce fait dans les mêmes proportions dans le bois en fin de vie. Par conséquent, la qualité des cendres dépend du type de combustibles bois utilisés.

Teneur en éléments traces métalliques des cendres (mg/kg de matière sèche)									
	Zinc	Chrome	Cuivre	Plomb	Nickel	Cadmium	Mercure	Sélénium	Arsenic
Min/Maxi	44/11 010	23/759	33/2 964	23/2 710	11/155	0,21/38	-/2,6	0,28/5,98	-/73
Médiane	459	95	239	144	40	3,41	0,11	2,51	8,9
Moyenne	1 256	150	371	396	46	5,42	0,22	2,57	15,5
Seuils	3 000	1 000	1 000	800	200	20	10	-	-

▲ Figure 65 : Teneurs en éléments traces métalliques des cendres sous foyer issues de chaufferies bois collectives (60 analyses – source Biomasse Normandie)

Les impuretés macroscopiques

Les impuretés supérieures à 4 mm (concrétions, « mâchefers », clous...) sont susceptibles de provoquer des dégâts, en amont dans la chaudière bois (grille de combustion, système de décendrage...) et, en aval, sur les équipements d'épandage (cas des épandeurs à chaux). Leur impact dans les parcelles agricoles est en revanche limité, en particulier pour ce qui concerne les morceaux de bois et les cailloux.

En conséquence, un conditionnement avant une valorisation en agriculture pour améliorer la qualité physique des cendres (broyage, criblage) peut se révéler nécessaire.

Impuretés supérieures à 4 mm (en % de la matière brute)			
Fraction non concassable	Cailloux	Clous	Bois
7,03	1,07	1,64	0,71

▲ Figure 66 : Impuretés supérieures à 4 mm

En conclusion, les cendres sous foyer présentent un réel intérêt agronomique en raison de leur valeur fertilisante et neutralisante : elles sont donc utiles aux sols et aux cultures et se substituent en partie aux produits du commerce, fortement énergivores. Elles contiennent cependant des éléments traces métalliques dont il faut contrôler la concentration régulièrement afin de s'assurer de la compatibilité avec une valorisation en agriculture. Les impuretés et les éventuelles concrétions peuvent quant à elles être éliminées par un conditionnement adapté (broyage, criblage, déferrailage...).



11.3. • Réglementation

Les chaufferies d'une puissance inférieure à 2 MW n'utilisant que de la biomasse à l'état naturel sont en dessous du seuil de déclaration et ne sont pas des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE). Elles n'ont aucun encadrement réglementaire spécifique.

Elles dépendent du Règlement Sanitaire Départemental (du département considéré) qui ne prévoit rien de spécifique concernant les résidus de combustion. En tant que matières fertilisantes, ces résidus peuvent être épandus sous réserve d'être homologués ou normalisés.

Le retour au sol des cendres sous foyer constitue donc la voie la plus pertinente au regard de l'intérêt agronomique. Ce dernier est encadré par le Code rural qui définit deux logiques, déchet ou produit, conditionnant les modalités de valorisation des cendres et le degré de responsabilité du producteur de cendres.

Commentaire

Il est conseillé de consulter au niveau départemental le Règlement Sanitaire, pouvant être plus contraignant.

11.3.1. • La logique produit

La logique produit implique soit :

- une conformité à une norme rendue d'application obligatoire par un arrêté ministériel (normalisation) ;
- une démarche d'homologation.

Dans ces deux cas :

- la mise sur le marché est possible ;
- la responsabilité du producteur s'arrête à la mise sur le marché du produit.

Normalisation

Pour les cendres, la norme applicable est la norme NF U 42-001 relative aux engrais qui définit les « engrais composés de P, K » sous la dénomination « cendres végétales ». Toutefois, dans la grande majorité des cas, les caractéristiques des cendres ne permettent pas d'atteindre les seuils exigés. Au cas par cas, selon la composition des cendres, il convient de compléter les cendres pour atteindre les seuils de la norme.

Commentaire

La norme d'application obligatoire NF U 44-051 « Amendements organiques » a été amendée en décembre 2010. Elle exclut de la liste positive les cendres de chaufferies bois, conférant de facto un statut « déchet » et non plus « produit » aux composts de déchets verts intégrant des cendres.



Homologation

La démarche d'homologation est longue, coûteuse et valable pour un seul site de production. Elle s'applique plutôt à des installations industrielles de forte puissance et s'appuie sur la constitution d'un dossier qui débute à partir du moment où le fertilisant est fabriqué à grande échelle. Cinq étapes sont nécessaires :

- étude de la constance de production ;
- étude de l'efficacité potentielle en conditions contrôlées (en laboratoire ou au champ) ;
- étude de l'innocuité du produit (innocuité potentielle et dans des conditions proches des conditions d'utilisation) ;
- caractérisation fine du produit en fin de démarche ;
- rédaction et envoi des dossiers techniques et administratifs.

Une fois constitué (1 an et demi environ), le dossier doit être déposé à l'ANSES qui l'instruit en 6 mois. A l'issue de cette procédure, le produit bénéficie d'une APV (Autorisation Provisoire de Vente). Pendant cette période transitoire, le fertilisant est assimilé à un produit ; des essais au champ sont néanmoins réalisés pour compléter le dossier et dans l'optique d'obtenir l'homologation définitive du fertilisant.

11.3.2. • La logique déchets

Si le produit n'est ni normalisé, ni homologué, il est considéré comme un déchet, dont le producteur est responsable jusqu'à son élimination complète (loi du 19 juillet 1975). L'élimination doit alors être réalisée dans le cadre d'un plan d'épandage. Le texte de référence est l'arrêté du 17 août 1998 qui encadre le retour au sol des déchets issus des installations classées soumises à autorisation. En l'absence de texte précis encadrant le retour au sol des cendres des installations bois non soumises à la réglementation ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement), cet arrêté sert de référence.

Dans ce cas, l'épandage est subordonné à une étude préalable, comprise dans l'étude d'impact, qui doit démontrer :

- l'innocuité (dans les conditions d'emploi) et l'intérêt agronomique des cendres (les cendres issues des chaufferies collectives au bois respectent très majoritairement les exigences de l'arrêté du 17 août 1998 et peuvent donc être épandues en agriculture) ;
- l'aptitude du sol à les recevoir ;
- le périmètre d'épandage et les modalités l'épandage.

L'étude justifie la compatibilité de l'épandage avec les contraintes environnementales recensées ou les documents de planification existants.



Le plan d'épandage implique également la réalisation, chaque année, de 3 documents principaux mis à disposition des services de la préfecture et dont le contenu est précisé dans l'arrêté. Il s'agit :

- d'un programme prévisionnel annuel d'épandage, qui doit être établi, en accord avec l'exploitant agricole, au plus tard un mois avant le début des opérations concernées ;
- d'un cahier d'épandage, conservé pendant une durée de dix ans ;
- d'un bilan annuel.

11.4. • Quantité de cendres récupérables

On rappelle que dans une chaufferie bois, on distingue deux types de cendres :

- les cendres provenant de la combustion du bois collectées sous foyer qui représente la partie la plus importante en quantité. Ces cendres présentent des teneurs significatives en potasse, en chaux et en magnésie ;
- les particules issues de la filtration des fumées également appelées cendres volantes. Elles concentrent les éléments traces métalliques considérés comme polluants.

Ces deux types de cendres sont collectées de façon séparative, les cendres volantes composées sont évacuées en centre d'enfouissement technique (centre de classe 1) et aucune valorisation ne peut être envisagée.

Il est à noter que les cendres issues de la filtration par multicyclone composées de particules plus importantes en taille peuvent être mélangées avec les cendres issues de la combustion et donc évacuées par le même système.

La quantité de cendres annuelle provenant de la combustion (tonnage T_c et volume V_c en m^3) peut être estimée de la manière suivante :

- traitement par voie sèche :

$$T_c = C_{\text{bois}} \times (1-h) \times t_c$$

$$V_c = T_c / 0,55$$

- traitement par voie humide :

$$T_c = 1,4 \times C_{\text{bois}} \times (1-h) \times t_c$$

$$V_c = T_c$$

Avec :

- T_c : tonnage en cendres par an ;
- V_c : volume annuel de cendres produites en m^3 ;
- C_{bois} : consommation annuelle de bois de la chaufferie en tonnes ;

- h : taux d'humidité moyen sur masse brute du combustible en % (dans la formule, pour une humidité de 30%, noter 0,3) ;
- t_c : teneur en cendres en % (dans la formule, pour une teneur de 1%, noter 0,01).

11.5. • Influence du type de bois utilisé

Le type de combustible bois utilisé dans la chaufferie a une incidence importante sur la quantité de cendres produites.

Un combustible tel que le granulé de bois a une teneur en cendres inférieure à 1%, en général de l'ordre de 0,7%, alors qu'un combustible tel que l'écorce a des taux de cendres pouvant aller jusqu'à 5%.

Il est important, au stade de la conception de la chaufferie, de déterminer le type de combustible utilisé et donc d'effectuer une estimation de la production de cendres et des moyens à mettre en œuvre (contenant, type de collecte, accès, stockage...).

Compte tenu de l'importance de ce paramètre, il est souhaitable de demander une analyse du taux de cendres du combustible retenu. Elle est généralement réalisée par un laboratoire spécialisé. Son coût est d'environ 150 € HT.

11.6. • Le stockage des cendres

11.6.1. • Les solutions de stockage des cendres

Généralement, une étape intermédiaire de transit/stockage avant l'épandage est nécessaire. Le stockage des cendres est réalisé de deux manières :

- sur le site de production, dans un caisson de 12 m³ maximum. Au-delà et au regard de la forte densité des cendres humides, la charge acceptable par le camion est dépassée ;
- sur une plateforme dédiée. Dans ce cas, il peut s'agir d'une plateforme regroupant la production de cendres de plusieurs sites. Cette solution permet d'optimiser les coûts de fonctionnement et les démarches administratives.

Stockage sur le site de production

Dans ce cas, le plan d'épandage est rattaché au site de production ce qui signifie concrètement que le régime de ce dernier (déclaration ou autorisation) est identique à celui du site de production. Par exemple, si la chaufferie est soumise à déclaration sous la rubrique 2910 A, le plan d'épandage est également soumis à déclaration.



Stockage sur une plateforme de regroupement

Plusieurs installations sont susceptibles d'accueillir des cendres : plateformes de compostage, plateformes de conditionnement bois, installations de traitement de déchets... Ces installations sont soumises à la réglementation ICPE (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement) et les principales rubriques concernées sont listées en (Figure 67).

N°	Désignation de la rubrique	Seuil
2780	1. Compostage de matière végétale ou déchets végétaux, d'effluents d'élevage, de matières stercoraires :	
	a) La quantité de matières traitées étant \geq à 50 t/j	Autorisation
	b) La quantité de matières traitées étant \geq à 30 t/j et $<$ à 50 t/j	Enregistrement
	c) La quantité de matières traitées étant \geq à 3 t/j et $<$ à 30 t/j	Déclaration
	2. Compostage de fraction fermentescible de déchets triés à la source ou sur site, de boues de station d'épuration des eaux urbaines, de papeteries, d'industries agroalimentaires, seuls ou en mélange avec des déchets admis dans une installation relevant de la rubrique 2780-1 :	
	a) La quantité de matières traitées étant \geq à 20 t/j	Autorisation
	b) La quantité de matières traitées étant \geq à 2 t/j et $<$ à 20 t/j	Déclaration
	3. Compostage d'autres déchets	Autorisation
2716	Le volume susceptible d'être présent dans l'installation étant :	
	1. \geq à 1 000 m ³ ;	Autorisation
	2. \geq à 100 m ³ mais $<$ 1 000 m ³ .	Déclaration contrôlée
2791	Installation de traitement de déchets non dangereux à l'exclusion des installations visées aux rubriques 2720, 2760, 2771, 2780, 2781 et 2782. La quantité de déchets traités étant :	
	1. \geq à 10 t/j	Autorisation
	2. $<$ à 10 t/j.	Déclaration Contrôlée

▲ Figure 67 : Rubriques ICPE (Installations classées pour la Protection de l'Environnement)

Le transit/traitement des cendres par une plateforme délocalisée entraîne une déconnexion entre les chaufferies et les cendres. En conséquence, le plan d'épandage est adossé à la plateforme de stockage/traitement et non pas à la (ou les) chaufferie(s).

Par ailleurs, dans ce cas de figure, il est primordial de mettre en place une démarche permettant de garantir la traçabilité des cendres. Une gestion par lot est alors préconisée pour conduire notamment les analyses de composition obligatoires avant chaque épandage.

11.6.2. • Les équipements pour le stockage des cendres

La densité de la cendre est en moyenne de 650 kg/m³ pour de la cendre sèche et jusqu'à 1050 kg/m³ pour de la cendre humide. La maintenance des bacs peut donc vite devenir problématique, c'est pourquoi il est nécessaire de bien réfléchir en amont à leur évacuation.



De manière générale, afin de garantir une évacuation des cendres facilitée, il est primordial :

- de proscrire les marches pour l'accès à la chaufferie afin de permettre de sortir les bacs à roulettes ;
- de proscrire les rampes d'accès à la chaufferie de pente supérieure à 10% ;
- de prévoir un système de monte-charge pour les chaufferies en sous-sol ;
- de toujours disposer d'un réceptacle de rechange pour remplacer celui qui doit être vidé ;
- de prévoir un accès par camion avec un espace de chargement pour l'enlèvement et le remplacement de la benne lorsque celle-ci est à l'extérieur de la chaufferie ;
- de prévoir le stockage des cendres à l'intérieur d'un local dans les zones à climat froid dans le cas d'un traitement par voie humide pour éviter le gel dans les bennes.

Il existe plusieurs types de bacs à cendres en fonction de la quantité produite par la chaufferie.

Sacs (« big bags »)

Les sacs de type « big bags » sont réservés aux cendres évacuées par voie sèche. Leur capacité de stockage est de 1,5 tonne. Il existe des stations de remplissage de ces sacs.

Bacs manutentionnables

Les bacs manutentionnables sont réservés aux faibles puissances, pour des approvisionnements inférieurs à 250 tonnes par an. Leur volume est d'environ 10 à 15 litres soit 6 à 10 kg.

Bacs sur roulettes

Les bacs sur roulettes sont adaptés à des chaufferies de moyenne puissance, pour des approvisionnements entre 250 et 1000 tonnes par an. Leur volume est d'environ 100 à 200 litres soit 65 à 130 kg.

Au-delà de 1000 tonnes d'approvisionnement par an, en fonction de la configuration de la chaufferie, il peut être intéressant d'utiliser des bacs de plus grande capacité, jusqu'à 500 litres. Leur manutention nécessite généralement des chariots élévateurs.

Bennes

Pour des puissances importantes, correspondant à des approvisionnements supérieurs à 2000 tonnes par an, des bennes sont requises. Leur volume utile est d'environ 6 à 10 m³ soit 6 à 11 tonnes.

Dans le cas spécifique d'un décentrage par voie humide et compte tenu l'humidité des cendres, ces dernières ont tendance à se coller contre le fond de la benne. Lorsque celle-ci est vidée, il n'est pas rare de ne pas pouvoir récupérer la totalité des cendres. Pour éviter ce phénomène, il est envisageable de tapisser le fond de la benne de quelques centimètres de sable.

11.7. • Les solutions possibles pour la valorisation des cendres

Malgré une réglementation peu précise dans le cas des chaufferies bois d'une puissance inférieure à 2 MW, différentes filières s'organisent autour de la valorisation des cendres de la combustion :

- la collecte en tant que déchet qui, en elle-même, n'est pas une valorisation et est une opération coûteuse pour le maître d'ouvrage ;
- la valorisation des cendres en engrais. Elle nécessite des études relativement coûteuses et longues avec un suivi et des analyses régulièrement effectuées sur les cendres produites. Cette valorisation est, à l'heure actuelle, très peu utilisée ;
- la valorisation des cendres dans la filière agricole sous réserve d'avoir effectué une analyse des éléments traces métalliques et des paramètres agronomiques. Les cendres sont alors utilisées en mélange ou co-compostage avec d'autres matières organiques. Elles sont employées directement au travers d'un plan d'épandage avec un ou plusieurs agriculteurs. Un suivi du plan d'épandage doit être réalisé par un bureau d'études ou une chambre d'agriculture.



L'Entretien et la maintenance 12



12.1. • L'état des lieux

Avant toute souscription d'un contrat d'entretien, le prestataire doit dresser un état des lieux de la chaufferie bois et le remettre au client.



Seul un état jugé satisfaisant de la chaufferie à l'issue de l'état des lieux permet de conclure le contrat. Dans le cas contraire, il est dressé un constat de non-conformité de l'installation ainsi qu'une proposition de remise en état préalable.

Il s'agit de regrouper les différentes informations et documents relatifs à la chaufferie bois. Les documents permettant de retrouver l'historique de l'installation sont recherchés et notamment l'attestation d'entretien.

Des vérifications sont réalisées afin de repérer des risques d'apparition d'anomalies dans le temps ou des signes de dérives possibles des performances du système.

12.2. • Le contrat

L'établissement d'un contrat d'entretien ou d'un contrat de maintenance est nécessaire afin de fiabiliser l'installation. Il a pour objectif :

- d'assurer des performances optimales de l'installation ;
- d'allonger la durée de vie du matériel ;
- de fournir une installation permettant d'atteindre le meilleur confort dans le temps au client.

Il définit les conditions dans lesquelles s'effectue la maintenance de l'installation en précisant notamment la fréquence annuelle des visites et la liste des opérations qui seront effectuées à chaque visite. Il doit contenir la désignation et la localisation des installations sur lesquelles sont effectuées les opérations de maintenance et/ou d'entretien.

On distinguera les opérations de contrôle pour l'exploitation et celles pour l'entretien et la maintenance.

Les obligations des deux parties, le titulaire du contrat d'entretien et le propriétaire de la chaufferie, peuvent différer selon le type de contrat mis en place par exemple dans le cas d'une prestation incluant la fourniture de combustible ou si le contrat comprend une clause d'intéressement.

Le propriétaire de la chaufferie, lors de la phase d'appel d'offres, doit établir un cahier des charges détaillé précisant les points suivants :

- la durée du contrat ;
- le périmètre de l'installation couvert par la prestation (stockage du combustible, chaufferie, sous-stations, réseau de chaleur...) ;
- une liste détaillée du matériel devant être pris en compte dans le cadre du contrat avec la description complète de chaque composant (chaudières, pompes, systèmes d'alimentation et de transferts des combustibles, systèmes d'évacuation des cendres, systèmes de filtration, équipements de contrôle, compteurs, compresseurs, régulateurs...) ;
- une liste des opérations principales d'entretien sur les équipements doit être incluse dans le cahier des charges. Le titulaire, lors de la remise de son offre, peut les modifier, corriger ou bien en proposer d'autres non prévues initialement compte-tenu de son expérience ;
- le type des combustibles utilisés ou à utiliser, ainsi que leurs caractéristiques (granulométrique, humidité...), la continuité de livraison. Une attestation doit être fournie à chaque livraison précisant l'origine du bois, la granulométrie et la plage de garantie d'hygrométrie ;
- si le combustible est à la charge du propriétaire de la chaufferie, le titulaire est responsable de la notification en temps utile des dispositions à prendre en vue d'assurer la continuité des approvisionnements, en quantité et qualité requises. Le cahier des charges doit alors préciser le délai qui est nécessaire au propriétaire de la chaufferie pour assurer l'approvisionnement ;
- qu'aucune modification du type de combustible ne peut se faire pendant la durée du contrat sans que le titulaire n'en soit informé et que la modification ne soit validée par un avenant au contrat voire une modification des prestations d'entretien ;



- l'obligation de tenue d'un livret de chaufferie consignant les intervenants, opérations de contrôle, surveillance, entretien ainsi que le remplacement de petit matériel ;
- à quelle partie incombe la responsabilité de faire procéder aux contrôles, surveillance et inspection demandés par la réglementation en vigueur.

Dans le cas où la responsabilité est à la charge du propriétaire de la chaufferie, le titulaire :

- doit avertir de la nature et de la périodicité de ces contrôles et visites ;
- est responsable des dispositions à prendre en vue de leur exécution ;
- doit se conformer aux recommandations ou sujétions qu'ils peuvent entraîner ;
- dans le cas de clauses d'intéressement, il doit être précisé les modalités de l'intéressement, les équipements et leurs contrôles nécessaires pour la détermination des paramètres utilisés pour le calcul ainsi que les conditions d'application de cet intéressement, conditions, répartitions tant en positif qu'en négatif.

Un procès-verbal contradictoire de l'état des lieux et des installations est établi au début et à la fin de l'exécution du contrat. Il en est de même à l'occasion de toute transformation effectuée pendant la durée du contrat.

12.3. • Les obligations réglementaires

Pour les chaudières de puissance inférieure à 400 kW, un entretien annuel est imposé par le Règlement sanitaire départemental type (RSDT) et par le Code de l'environnement (articles R. 224-41-4 à R. 224-41-9).

L'arrêté du 15 septembre 2009 fournit des indications sur l'entretien annuel : vérification de la chaudière, nettoyage et réglage, conseils.

L'entretien annuel doit être assuré par un professionnel qualifié.

L'annexe 1 de l'arrêté liste les opérations à mener a minima sur une chaudière bois (Figure 68).



Opérations d'entretien annuel d'une chaufferie bois imposées par l'arrêté du 15 septembre 2009

Nettoyage des surfaces d'échange
Vérification complète de l'appareil
Contrôle de la régulation, si existante
Contrôle du raccordement et de l'étanchéité du conduit d'évacuation des produits de combustion
Vérification des organes de sécurité
Vérification de l'état des joints
Nettoyage du ventilateur, si existant
Vérification du système d'alimentation automatique (pour les chaudières automatiques uniquement)
Décendrage approfondi
Mesure, une fois les opérations de réglage et d'entretien de l'appareil réalisées, de la teneur en monoxyde de carbone (CO) dans l'ambiance et à proximité de l'appareil en fonctionnement
Vérification que la teneur en monoxyde de carbone mesurée est inférieure à 50 ppm
Mesure de la température des fumées
Mesure de la teneur en O ₂ et en CO ₂ , pour les chaudières automatiques uniquement

▲ Figure 68 : Opérations a minima imposées lors de l'entretien annuel d'une chaufferie bois de puissance inférieure à 400 kW

Pour les chaudières de puissance supérieure à 400 kW, les obligations supplémentaires figurent dans les articles R. 224-20 à R. 224-41-3 du Code de l'environnement :

- obligations de l'exploitant de la chaufferie : tenue du livret de chaufferie (cf. 12.5), vérification périodique du rendement et comparaison à des valeurs minimales, appareils de contrôle imposés ;
- contrôle périodique obligatoire tous les deux ans par un organisme accrédité.

12.4. • Les opérations d'entretien et de maintenance

Les opérations d'entretien/maintenance indiquées en (Figure 69) ne concernent que les équipements spécifiques à la chaufferie bois. La liste n'est pas exhaustive.

Opérations d'entretien/maintenance d'une chaufferie bois	
Silo de stockage du combustible et système de transfert	
Une fois par mois :	Graissage des paliers de transmission
Une fois par semestre :	Nettoyage des buses de pulvérisation sur le carénage du silo
Une fois par an :	Vérification du serrage des systèmes de fixation du système de dessilage et de transfert Contrôle du bon état des systèmes (vérification si présence de déformations, anomalies...) Vidange et remplacement de l'huile et filtre de la centrale hydraulique
Système d'alimentation en combustible de la chaudière	
Une fois par semestre :	Graissage des paliers du clapet Nettoyage de la buse d'extinction incendie du réservoir d'alimentation



Opérations d'entretien/maintenance d'une chaufferie bois	
Une fois par an :	Contrôle de l'étanchéité du clapet Vérification de l'état des joints de portes du réservoir Vidange et remplacement de l'huile du réducteur de la vis Systèmes d'extinction de départ de feu ou de sprinklage le cas échéants
Chaudière	
Une fois par mois :	Nettoyage de la sonde oxygène
Une fois par semestre :	Nettoyage des trous d'injection d'air dans le foyer
Une fois par an :	Nettoyage des turbines des ventilateurs d'air primaire et secondaire Vérification du fonctionnement des clapets d'admission d'air et/ou de recyclage des fumées Vidange, remplacement filtre et huile de la centrale hydraulique Nettoyage et ramonage des faisceaux des échangeurs
Filtre multicyclone	
Une fois par mois :	Vérification de l'absence de colmatage en partie basse des cyclones
Une fois par semestre :	Nettoyage du tube de collecte des fumées de la sonde à oxygène Vérification et nettoyage des particules en partie haute des cyclones
Extracteur des fumées	
Une fois par semestre :	Vérification de l'état des courroies d'entraînement et graissage des paliers
Une fois par an :	Nettoyage de la turbine de l'extracteur
Système de transfert des cendres	
Une fois par semestre :	Graissage des paliers de guidage
Une fois par an :	Vidange et nettoyage du système de transfert des cendres Vérification générale de l'état du système de transfert (usure, déformations...)
Conduits de fumée	
Une fois par semestre :	Ramonage complet des conduits de fumée
Une fois par an :	Ramonage des carneaux Ramonage des conduits de raccordement.
Systèmes de filtration	
Une fois par mois :	Nettoyage de l'intérieur du filtre Contrôle du bon état des manches
Une fois par semestre :	Nettoyage de la buse d'extinction incendie (filtre à manches) Vérification du bon fonctionnement des clapets de by-pass
Une fois par an :	Vidange et nettoyage du système de transfert des particules Graissage des paliers des systèmes d'entraînement Vérification des systèmes de frappe (électrofiltre) Vérification de l'état des électrodes (électrofiltre) ainsi que le bon serrage des câbles d'alimentation Vérification de la distance de décharge entre le système des électrodes de décharge et les plaques collectrices (électrofiltre) Contrôle des connexions de la ligne haute tension de l'appareil HT vers le champ électrique (électrofiltre) Vérification de l'étanchéité des portes du système Remplacement des manches défectueuses (filtre à manches) Nettoyage du système de décolmatage et des buses d'insufflation (filtre à manches)

▲ Figure 69 : Exemple d'opérations de contrôle pour l'entretien/maintenance d'une chaufferie bois

Commentaire

Cette liste n'est pas exhaustive et peut être complétée selon les caractéristiques et l'importance de l'installation.

12.5. • Le livret de chaufferie

Selon le Code de l'Environnement (article R224-29), l'exploitant d'une chaufferie de puissance supérieure à 400 kW tient à jour un livret de chaufferie contenant les informations suivantes :

- l'identification de la chaufferie ;
- les caractéristiques de la chaufferie, des installations de stockage de combustible et des équipements ;
- les conditions générales d'utilisation de la chaufferie ;
- les résultats des contrôles, mesures et vérifications, visa des personnes ayant effectué ces opérations, des consignations des observations faites et des suites données ;
- les incidents d'exploitation avec des fiches d'analyse ;
- les livraisons de combustible ainsi que leurs consommations annuelles ;
- les attestations à chaque livraison précisant l'origine du bois, la granulométrie et la plage de garantie d'hygrométrie ;
- les dates des vérifications des systèmes d'extinction de départ de feu ou de sprincklage ;
- les indications relatives à la mise en place, au remplacement ou à la réparation des appareils de réglage et de contrôle ;
- les indications sur les travaux d'entretien, opérations d'entretien et de ramonage ;
- les indications de toutes les modifications apportées à l'installation ;
- les résultats des contrôles réglementaires ;
- les rapports d'inspection et de contrôle des organismes tiers demandés par la réglementation.

Commentaire

Il est recommandé de tenir à jour un livret de chaufferie pour des puissances inférieures à 400 kW de façon à bénéficier d'un historique de l'installation.

PARTENAIRES du Programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) ;
- Association des industries de produits de construction (AIMCC) ;
- Agence qualité construction (AQC) ;
- Confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment (CAPEB) ;
- Confédération des organismes indépendants de prévention, de contrôle et d'inspection (COPREC Construction) ;
- Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) ;
- Électricité de France (EDF) ;
- Fédération des entreprises publiques locales (EPL) ;
- Fédération française du bâtiment (FFB) ;
- Fédération française des sociétés d'assurance (FFSA) ;
- Fédération des promoteurs immobiliers de France (FPI) ;
- Fédération des syndicats des métiers de la prestation intellectuelle du Conseil, de l'Ingénierie et du Numérique (Fédération CINOV) ;
- GDF SUEZ ;
- Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie ;
- Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement ;
- Plan Bâtiment Durable ;
- SYNTEC Ingénierie ;
- Union nationale des syndicats français d'architectes (UNSFA) ;
- Union nationale des économistes de la construction (UNTEC) ;
- Union sociale pour l'habitat (USH).

Les productions du Programme « Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 » sont le fruit d'un travail collectif des différents acteurs de la filière bâtiment en France.



GUIDE

LES CHAUFFERIES AU BOIS

DÉCEMBRE 2015

NEUF-RÉNOVATION

Cet ouvrage traite des chaufferies bois dédiées à un ou à quelques bâtiments, pour des puissances thermiques installées cumulées inférieures à 2 MW et utilisant uniquement de la biomasse à l'état naturel. Il exclut les chaufferies couvertes par la réglementation des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) – Rubrique 2910 combustion.

Il s'agit d'identifier les bonnes pratiques pour la conception, la mise en œuvre et l'exploitation d'une chaufferie au bois en réponse aux pratiques constatées et aux difficultés rencontrées par les professionnels.

Sans prétendre à l'exhaustivité ou à donner des « recettes », ce guide valorise les savoir-faire en présentant les choix et solutions retenus et réalisés par les Maîtres d'Ouvrage et leurs équipes (architectes, bureaux d'études, entreprises) sur des opérations existantes.



PROGRAMME D'ACCOMPAGNEMENT DES PROFESSIONNELS

« Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012 »

Ce programme est une application du Grenelle Environnement. Il vise à revoir l'ensemble des règles de construction, afin de réaliser des économies d'énergie dans le bâtiment et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr

