

COMITÉ INTERPROFESSIONNEL DU BOIS-ÉNERGIE

Recommandations pour améliorer les
performances environnementales des
installations biomasse

Note pédagogique

CIBE

Avec le soutien de





Remerciements

La présente note de recommandation a pris racine grâce à l'expertise et au travail minutieux de l'association « AILE » (Association d'initiatives locales pour l'énergie et l'environnement en Bretagne), qui en a assuré la rédaction et la structuration. Leur engagement a été le véritable combustible de ce projet, et nous remercions chaleureusement Antoine QUEVREUX, Marc Le TREÏS et Antoine CAILLIE.

Un grand merci également à Éric CASENOVE (Bois & Energies 66), François COIFFET (BEIRENS), Céline TOURNEBIZE (Compte-R), Nicolas WILLERVAL (Saelen-Energie) et Marine FICHAU (INDDIGO) pour leurs corrections, remarques et commentaires, qui ont permis d'affûter et d'enrichir ce document. Leur regard critique et leurs suggestions ont été déterminants pour aboutir à ce résultat final.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	5
1 Introduction.....	6
1.1 Contexte	6
1.2 Objectifs de la note.....	7
1.3 Bibliographie citée	8
2 Leviers pour réduire les émissions polluantes des chaufferies biomasse	9
3 Recommandations pour réduire les émissions polluantes des chaufferies biomasse	10
3.1 En phase conception	11
3.1.1 Utiliser des indicateurs pour mettre en évidence des risques de surdimensionnement	11
3.1.2 Prendre en compte le foisonnement.....	14
3.1.3 Prendre en compte l'état des lieux des besoins et des évolutions futures	16
3.1.4 Faire des choix techniques en adéquation avec les compétences d'exploitation disponibles	18
3.1.5 Limiter les sources d'arrêts techniques injustifiés des chaudières bois.....	20
3.1.6 Mettre en place du stockage thermique bien dimensionné	22
3.1.7 Le dimensionnement d'une installation doit être cohérent du silo au radiateur, simple et compréhensible	25
3.1.8 Adapter les équipements de filtration et de mesure	27
3.2 En phase réception.....	30
3.2.1 Préparer l'étape de réception	30
3.2.2 Suivre la mise en service et optimiser les réglages	32
3.3 En phase exploitation	34
3.3.1 Définir le rôle de chaque opérateur	34
3.3.2 Contrôler la qualité du combustible	35
3.3.3 Programmer et réaliser la maintenance préventive	37
3.3.4 Le suivi d'exploitation et le bilan annuel : boussole vers la performance de l'installation.....	40
3.3.5 Assurer les conditions de performance des équipements de filtration	42
4 Conclusion.....	43
5 Glossaire	44
6 Bibliographie.....	46
Annexe I : Méthode de conception d'un stockage thermique	49

Liste des figures

Figure 1 : Rosace illustrant le triptyque de la performance environnementale et technique des chaufferies biomasse 9

Figure 2 : Leviers illustrés par les rosaces 10

Figure 3 : Monotone de charge du taux de couverture d'une chaudière bois dimensionnée à une puissance inférieure à la puissance maximale (Source : <https://energieplus-lesite.be/>) 12

Figure 4 : Interface proposée par l'outil de prédimensionnement ENR SIM 13

Figure 5 : Schéma explicatif du foisonnement 14

Figure 6 : Courbe de suivi de température de fumées et impact de l'absence de dispositif de ramonage sur les arrêts chaudière (Source AILE) 21

Figure 8 : Etat des lieux du rendement des chaudières bois déchiqueté en fonction du système installé 25

Figure 9 : Comparaison des performances de filtration des principaux équipements de filtration de chaufferies biomasse (Source : ADEME. (2023, 30 juin). Émissions atmosphériques des chaufferies bois de puissance inférieure à 1 MW 29

Figure 10 : Augmentation rapide des températures de fumées suite à un ramonage chaudière (cas d'une chaudière non équipée d'un système de ramonage automatique des tubes de fumées) 38

Figure 7 : Exemple de profil de consommation d'un bâtiment d'enseignement 50

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des valeurs limites d'émissions en fonction de la puissance installée 28

Résumé

La biomasse représente une solution clé pour décarboner la production de chaleur, notamment dans les territoires ruraux et périurbains. Pourtant, les chaufferies de petite puissance (inférieures à 1 MW) peuvent, dans certains cas, émettre des polluants atmosphériques (particules fines, oxydes d'azote, composés organiques volatils) en quantités supérieures aux recommandations réglementaires appliquées aux chaufferies de plus grande puissance, compromettant ainsi leurs bénéfices environnementaux. Il apparaît que les causes principales de ces dysfonctionnements, sont souvent liées à des choix techniques inadaptés, à une mauvaise anticipation des besoins réels, ou à une exploitation insuffisamment rigoureuse.

Les principaux constats révèlent que :

- Le surdimensionnement des installations est fréquent, entraînant des cycles de marche/arrêt impactant la combustion et la durée de vie des équipements.
- Les compétences disponibles pour l'exploitation ne sont pas toujours prises en compte lors de la conception, ce qui complique la maintenance et le réglage des installations.
- La qualité variable du combustible (taux d'humidité, granulométrie, présence d'impuretés) impacte directement les émissions et la performance énergétique.
- Les équipements de filtration et de mesure sont parfois sous-dimensionnés ou mal entretenus, réduisant leur efficacité sur le long terme.

Pour y remédier, cette note propose des recommandations concrètes, organisées sous forme de fiches et selon les trois phases clés du cycle de vie d'une chaufferie :

- **Dès la conception**, il est essentiel de s'appuyer sur des indicateurs robustes pour éviter le surdimensionnement, d'anticiper les évolutions futures des besoins, et de choisir des technologies adaptées aux compétences disponibles localement. L'intégration de technologies spécifiques, tels qu'un ballon tampon ou un système de ramonage automatique sont également des leviers majeurs pour optimiser les performances ;
- **Lors de la réception**, une préparation minutieuse de la mise en service, en présence de toutes les parties prenantes et un réglage précis des paramètres de combustion permettent de garantir des performances optimales dès le démarrage ;
- **En exploitation**, le contrôle régulier de la qualité du combustible, la maintenance préventive et le suivi annuel des performances sont indispensables pour maintenir la chaufferie dans des conditions optimales.

L'application systématique de ces bonnes pratiques permet non seulement de réduire les émissions polluantes, mais aussi d'améliorer la durabilité technique et économique des installations. En intégrant ces recommandations dès la phase de programmation et en associant l'ensemble des acteurs (maîtres d'ouvrage, exploitants, fournisseurs), il est possible de concilier performances environnementales, efficacité énergétique et viabilité opérationnelle.

1 Introduction

1.1 Contexte

En Mars 2025, le journal Le Monde, alertait sur “les petites chaufferies au bois et leur impact sur la qualité de l’air”. Cet article, repris par d’autres médias, fait suite à une étude publiée par AirParif en 2025 intitulée « Mesures à l’émission de petites chaufferies biomasse (<500kW) en conditions réelles d’exploitation ».

AirParif a réalisé un suivi, sur un échantillon de 8 « petites » chaufferies collectives inférieures à 500 kW (dont 4 au bois déchiqueté mises en service entre 2008 et 2018 et 4 au granulé) en Ile-de-France. Aucune de ces installations ne comporte de système de filtration. Certaines des installations ont des modes de fonctionnement cycliques avec une alternance fréquente de phases d’arrêt/démarrages. La qualité du combustible sur les chaufferies suivies est également variable.

Les résultats montrent que les émissions atmosphériques des chaufferies fonctionnant au bois déchiqueté ont une variabilité importante, ce qui indique que le fonctionnement des installations a un impact important sur les émissions.

L’accent est également mis sur le fait que les facteurs d’émissions de particules fines des chaufferies bois déchiquetés suivies sont supérieurs au facteur d’émission utilisé par le CITEPA (voir encadré) et supérieurs aux facteurs d’émissions des chaufferies plus puissantes (>50 MW).

Facteur d’émission : de quoi parle-t-on ?

Cet indicateur permet de définir les émissions atmosphériques pour chaque polluant considéré. Il est notamment utilisé pour le calcul des inventaires nationaux d’émissions atmosphériques, publiés par le CITEPA. Le facteur d’émission TSP (particules totales), utilisé par le CITEPA pour les chaufferies inférieures à 20 MW est de **64 g/GJ**. C’est une valeur moyenne utilisée pour estimer les émissions nationales du parc de chaufferie actuel, par conséquent certaines installations ont des émissions supérieures et d’autres plus performantes ont des émissions moindres.

Il faut noter que l’obligation de suivi des émissions et de respect de seuils réglementaires n’est imposée qu’aux installations classées ICPE, c’est-à-dire les chaufferies de puissance supérieure à 1 MW. C’est à partir de 2022 que sont mises en place les exigences liées aux demandes de financement via le « Fonds Chaleur » de l’ADEME en matière d’émission des particules à 50 mg/Nm³ (à 6% d’O₂) pour les chaudières dès 500 kW. Ainsi la majorité des petites installations en fonctionnement, ne sont pas équipées de système de filtration et en l’absence de contrôle et de sensibilisation sur ce sujet, la conduite et la conception de ces installations n’intègrent pas toujours ces enjeux. A compter de 2026, le Fonds Chaleur devrait imposer des critères relatifs au respect des valeurs limites d’émission pour toutes les installations dès 150 kW et recommande des hauteurs minimales de cheminées à respecter pour assurer la bonne dispersion des polluants résiduels.

L’étude « Émissions atmosphériques des chaufferies bois de puissance inférieure à 1 MW ou ACIBIOQA » a été commanditée par l’ADEME et piloté par INDDIGO, en partenariat avec l’INERIS et CITEPA en 2023. Basée sur une campagne de mesures sur 6 installations (< 1,6 MW), elle questionne sur la nécessité, sur ces installations inférieures à 1 MW, de filtre spécifique (filtre à manche, électrofiltre) pour atteindre des niveaux suffisamment bas pour respecter les seuils du Fonds Chaleur.

Compte tenu des résultats, l'INERIS a proposé une révision du facteur d'émission utilisé par le CITEPA dans les inventaires nationaux de 100 g/GJ pour les chaufferies < 1MW.

Cette étude a également abouti à des recommandations concernant le dimensionnement des chaudières pour réduire leurs cycles de fonctionnement et sur le maintien de la qualité combustible.

Une distinction entre émissions et concentrations à approfondir ?

Le laboratoire CERIC a étudié les données de 89 stations d'analyse de l'air, réparties en France Métropolitaine, du 1^{er} janvier 2021 au 31 décembre 2023. Ce travail vise à démontrer la différence entre "émissions" et "concentrations" en polluants atmosphériques. La concentration dans l'air représente ce qui est réellement respiré par la population.

« Cette étude, portant sur les relevés réels de concentrations, révèle que les activités hivernales représentent en moyenne 22,4% des concentrations annuelles de particules fines PM2,5. En conséquence, la part du chauffage au bois domestique dans les concentrations nationales de particules PM2,5 est inférieure à la moyenne des activités hivernales et très largement inférieure aux estimations d'émissions de 64%, chiffre issu des rapports annuels SECTEN du CITEPA. »

Le rapport et la synthèse de l'avis d'expert du CERIC, **Qualité de l'air : quelle contribution du chauffage au bois aux émissions de PM2,5 ?** est disponible sur : <https://www.laboratoire-ceric.com/chauffage-au-bois-et-qualite-de-lair/>

Ainsi, la biomasse constitue une ressource renouvelable majeure pour la production de chaleur, contribuant significativement à la transition énergétique et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, les petites chaufferies fonctionnant au bois déchiqueté peuvent être source d'émissions atmosphériques, notamment en l'absence d'équipements de filtration et lorsque la combustion est mal maîtrisée. Des solutions efficaces permettent de limiter ces émissions, au moment de la conception (dimensionnement, filtres) et lors de l'exploitation (formation du personnel, réglages de l'installation, qualité combustible).

1.2 Objectifs de la note

Dans ce contexte, l'animateur bois-énergie (<https://cibe.fr/animation-bois-energie/>) doit continuer à accompagner les projets existants et futurs dans une transition énergétique la plus sobre et durable possible. Ce document leur est notamment adressé, ainsi qu'aux concepteurs, maîtres d'ouvrage et exploitants, proposant des pistes concrètes pour réduire les émissions polluantes des chaufferies biomasse de petite puissance, à chaque étape de leur cycle de vie : conception, réception et exploitation. Elle formule des recommandations ciblées par l'étude « ACIBIOQA » (2023) et d'AirParif (2025), enrichies par l'expérience du réseau d'animateurs bois-énergie et de la commission « Retours d'expériences sur la conception, réalisation et exploitation des chaufferies » du CIBE, afin de garantir une performance environnementale durable, tout en assurant la pérennité économique et technique des installations.

1.3 Bibliographie citée

- **Le Monde.** (2025, 27 mars). *Alerte sur les petites chaufferies au bois et leurs impacts sur la pollution de l'air.* https://www.lemonde.fr/planete/article/2025/03/27/alerte-sur-les-petites-chaufferies-au-bois-et-leurs-impacts-sur-la-pollution-de-l-air_6586704_3244.html
- **AirParif.** (2025). Étude - Mesures à l'émission de petites chaufferies biomasse (< 500 kW) en conditions réelles d'exploitation. https://www.airparif.fr/sites/default/files/2025-03/Rapport_Etude_Biomasse.pdf
- **ADEME.** (2023, 30 juin). *Émissions atmosphériques des chaufferies bois de puissance inférieure à 1 MW.* <https://librairie.ademe.fr/air/6367-emissions-atmospheriques-des-chaufferies-bois-de-puissance-inferieure-a-1-mw.html>

2 Leviers pour réduire les émissions polluantes des chaufferies biomasse

Assurer la performance environnementale et technique d'une installation de chauffage repose sur un équilibre subtil entre plusieurs facteurs. Ils sont indissociables et constituent un triptyque fondamental (Figure 1) à la base de toute démarche cohérente et durable en matière de développement de chaufferie biomasse :

Une conception adaptée :

Elle repose sur le bon dimensionnement des chaudières et de leurs périphériques, l'intégration d'équipements performants, et l'utilisation d'outils de mesure et de filtration appropriés. Cette étape conditionne l'efficacité globale de l'installation et sa capacité à répondre aux besoins tout en limitant les pertes et les émissions.

La formation, le bon outillage et la disponibilité de l'exploitant :

Au-delà de l'exploitant, l'ensemble des opérateurs intervenant dans le projet, concepteurs, installateurs et mainteneurs, doivent être bien formés et correctement équipés pour garantir une mise en œuvre conforme, un suivi rigoureux, et une maintenance optimisée. Le niveau de compétence suffisant de l'ensemble des intervenants est un levier incontournable pour éviter les dérives de performance.

Le choix d'un combustible de qualité : L'adéquation entre le combustible utilisé et les équipements en place en chaufferie est un gage de bon fonctionnement, de longévité des installations, et de réduction des émissions. L'exploitation sera d'autant plus simple si le combustible est conforme aux attentes du système.

Ces trois leviers sont indissociables pour l'examen des performances d'une installation. Leur prise en compte est nécessaire pour formuler des recommandations pour réduire l'impact environnemental et renforcer les performances techniques.

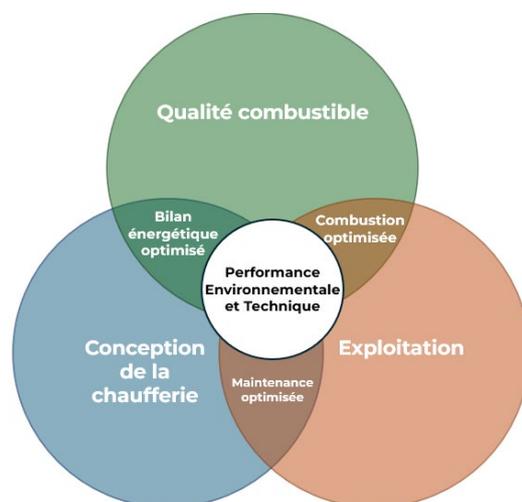


Figure 1 : Rosace illustrant le triptyque de la performance environnementale et technique des chaufferies biomasse

3 Recommandations pour réduire les émissions polluantes des chaufferies biomasse

Les enseignements de l'étude « ACIBIOQA » et les retours d'expérience du réseau des adhérents du CIBE permettent de dresser un recueil de recommandations pratiques. Celles-ci sont présentées sous forme de fiches individuelles exposant :

- Un constat (retour d'expérience, pratiques observées fréquemment etc.) ;
- Des recommandations s'appuyant sur des bases théoriques et/ou pratiques et des exemples ;
- Des indications sur le moment auquel mobiliser ces conseils ;
- Un recueil des outils existants.

Nous les avons classées en fonction de la phase de développement du projet biomasse.

- En phase « Conception » ;
- En phase « Réception » ;
- En phase d'« Exploitation ».

Chaque recommandation est illustrée par une rosace illustrant le ou les leviers utilisés (Figure 2) :

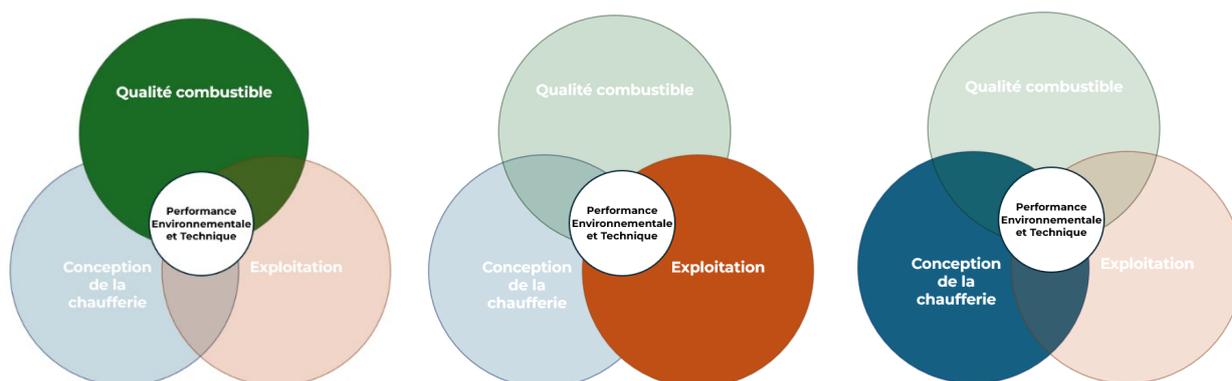
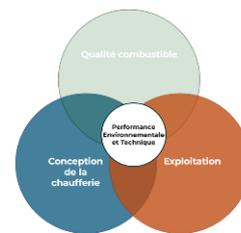


Figure 2 : Leviers illustrés par les rosaces

3.1 En phase conception

3.1.1 Utiliser des indicateurs pour mettre en évidence des risques de surdimensionnement



Constat :

L'étape de dimensionnement d'une chaufferie bois est soit négligée lorsque le maître d'œuvre n'est pas sensibilisé au sujet (cas de la construction d'un bâtiment par une équipe de maîtrise d'œuvre n'intégrant pas les compétences bois-énergie, non demandées au CCTP), soit fait l'objet d'une étude approfondie par un bureau d'étude justifiant d'une compétence précise (type OPQIBI 20.08). Dans le premier cas, il existe un indicateur qui permet d'avoir un premier avis critique sur le dimensionnement sans avoir recours à des outils de calcul complexes.

L'étape de dimensionnement est importante pour éviter le sous dimensionnement, qui impliquerait un fonctionnement trop intensif du générateur entraînant une usure prématurée, ou le surdimensionnement, avec le risque de fonctionnement en sous-régime ou de mise en arrêt thermostatique trop fréquentes.

Le risque en matière de dimensionnement est d'abord de ne pas satisfaire les besoins thermiques identifiés. Alors le premier réflexe est de surdimensionner. Mais cette pratique, habituelle pour les énergies fossiles (règles des « 2/3 ») est néfaste pour les performances des chaudières à bois et préjudiciable pour l'économie du projet.

D'autre part, dans le cas des chaudières biomasse, la variabilité du combustible alimentant la chaudière, la puissance nominale ne peut être garantie en continu. Il faut donc veiller à ne pas sous-dimensionner la chaudière. Par sécurité, un facteur 1,1 doit être considéré entre la puissance nominale et la puissance continue afin de bien prendre en compte la variabilité du combustible (décote de 10% de la puissance continue par rapport à la puissance nominale).



Recommandations :

Pour cela, le rapport entre la puissance du générateur et la quantité d'énergie produite fournit un bon repère de la pertinence du taux d'usage du matériel : le nombre d'heures de fonctionnement équivalent en pleine puissance (HEPP) est un indicateur qui peut être utilisé en première approche.

L'établissement d'une courbe monotone d'appel de puissance nécessite une modélisation du fonctionnement du bâtiment. Elle est donc utilisée en seconde approche lors des études de faisabilité ou du diagnostic : il s'agit d'une courbe de fréquence des appels de puissance sur laquelle été intégrée la période de fonctionnement des différents générateurs.

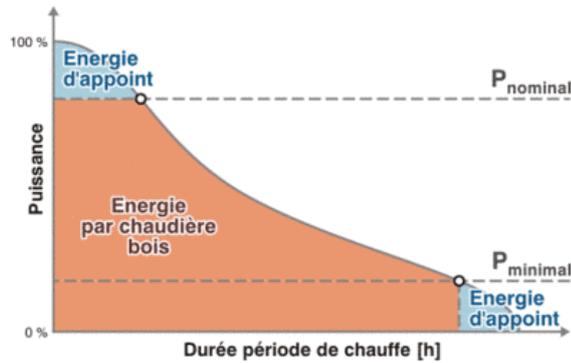


Figure 3 : Monotone de charge du taux de couverture d'une chaudière bois dimensionnée à une puissance inférieure à la puissance maximale (Source : <https://energieplus-lesite.be/>)

Attention : l'indicateur HEPP ne doit pas être pris comme outil de dimensionnement mais comme une façon d'alerter sur des risques de financements non adaptés.



Exemples :

- Dans ces conditions d'éligibilité aux aides publiques, L'ADEME exige de justifier d'un nombre HEPP supérieur à 1 200 heures. Des dérogations existent pour prendre en compte les cas particuliers (chaudières en cascade, présence d'un ballon-tampon, intermittence d'utilisation spécifique). Ces dérogations sont détaillées dans les [Conditions d'Éligibilité et de Financement de l'ADEME](https://agir.ademe.fr). (<https://agir.ademe.fr>)
- Les constructeurs peuvent aussi garantir leur matériel dans des conditions de fonctionnement précises, en indiquant par exemple un nombre maximum d'heures équivalent pleine puissance annuelle.



Quand appliquer ces recommandations ?

L'indicateur HEPP peut être adapté au stade de l'étude d'opportunité mais, rapidement, il est important d'affiner le profil de consommation des bâtiments en phase d'étude de faisabilité. Trop souvent dans les cahiers des charges des marchés de maîtrise d'œuvre lié à une création de bâtiments, il manque la simulation suffisamment fine des besoins pour permettre le dimensionnement du générateur bois.



Quels outils existent ?

Les animateurs peuvent être vigilants en relisant les cahiers des charges des études, mais aussi en utilisant des indicateurs pour contrôler :

Il existe des outils de modélisation réalisant une première approche de la monotone d'appel de puissance disponible en ligne : exemple <https://enssim.ines-solaire.org/>

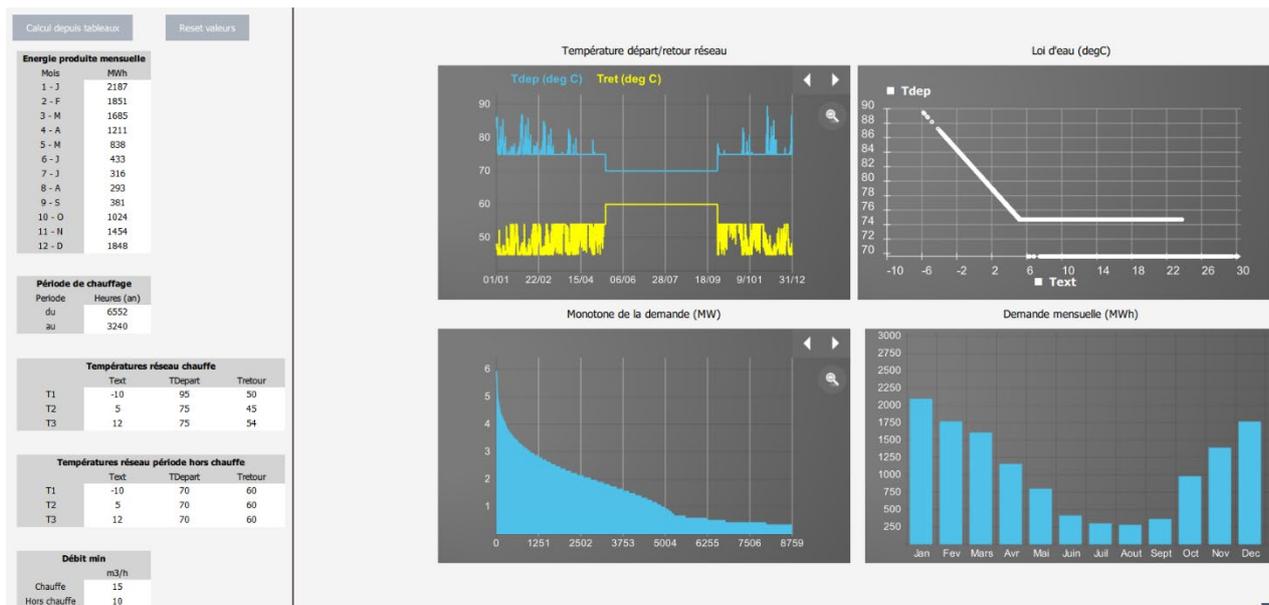


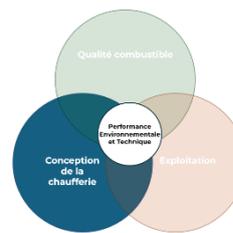
Figure 4 : Interface proposée par l'outil de prédimensionnement ENR SIM

3.1.2 Prendre en compte le foisonnement



Constat :

Dans le cas d'un réseau de chaleur : la somme des puissances installées dans chaque bâtiment ne doit pas forcément être égale à la puissance installée dans une chaufferie centrale.



Un parallèle peut être fait pour un bâtiment disposant de plusieurs zones de chauffage : la puissance installée en chaufferie n'est pas égale à la somme de puissances des émetteurs de chaque zone de chauffage.



Recommandations :

Lors de l'étude de faisabilité, le pré-diagnostic doit permettre d'interroger le fonctionnement des différentes zones chauffées dans un bâtiment pour chaque établissement potentiellement raccorder (Figure 5).

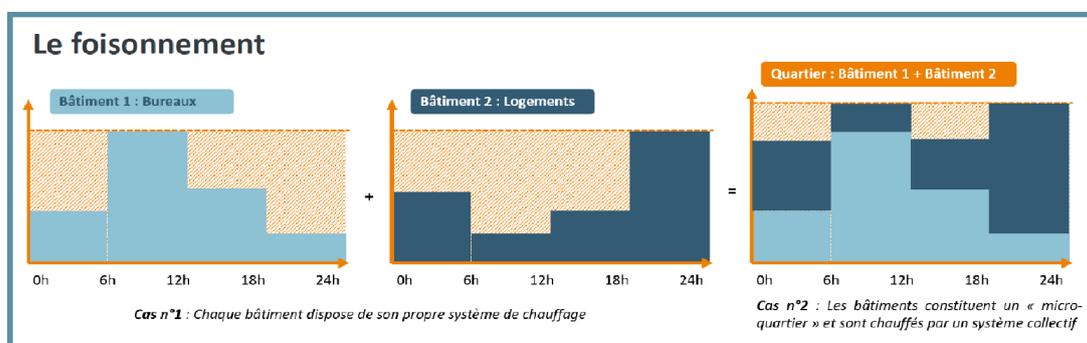


Figure 5 : Schéma explicatif du foisonnement

Le pré-diagnostic énergétique est aussi l'occasion de remettre en question des pratiques recensées et d'inciter à faire évoluer les comportements : il peut être proposé d'étagé les appels de puissance en tenant compte des contraintes d'utilisation de chaque bâtiment. Cette proposition doit être en mesure de préciser les conditions techniques nécessaires à remplir pour réussir ce réglage (évolution des outils de régulation, des comportements etc...).



Exemples :

➤ Dans le cas d'un groupe scolaire avec l'installation d'une chaufferie bois et de 2 sous-stations il peut être envisagé de programmer le préchauffage de chaque sous-station successivement et non concomitamment. Cela aurait pour intérêt d'atténuer le pic d'appel de puissance d'une relance après un week-end avec chauffage au ralenti

➤ Dans une scierie, la mise en route des différents séchoirs à bois peut être faite successivement pour limiter l'appel de puissance, tout en laissant le temps au remplissage des séchoirs.



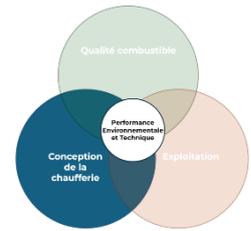
Quand appliquer ces recommandations ? Ce diagnostic et ces conseils peuvent relever de l'étude de faisabilité ou de la phase diagnostic de la mission de maîtrise d'œuvre.



Quels outils existent ?

- Pré-diagnostic énergétique recommandé dans le cahier des charges d'étude de faisabilité
- Echange avec les parties prenantes, les utilisateurs et les conseillers énergie
- **Programme PROFEEL. (2023).** Guide : Impact des choix de conception sur la performance énergétique des générateurs de chauffage en habitat collectif.
<https://www.proreno.fr/documents/impact-des-choix-de-conception-sur-la-performance-energetique-des-generateurs-de-chauffage-en-habitat-collectif>

3.1.3 Prendre en compte l'état des lieux des besoins et des évolutions futures



Constat :

Le diagnostic énergétique réalise une analyse à partir de la rétrospective des consommations. Or le dimensionnement pour une future installation doit aussi s'appuyer sur un regard prospectif afin de prendre en compte les évolutions probables.

Potentiel :

Le dimensionnement d'un projet de réseau de chaleur ciblant des bâtiments qui ne sont pas encore construits représente toujours un risque qu'il faut mesurer. Il est d'autant plus élevé lorsque le maître d'ouvrage du réseau de chaleur (commune par exemple) n'est pas le même que le maître d'ouvrage de ces futurs bâtiments (opérateur immobilier par exemple) ou bien que l'émergence de ces futurs bâtiments est suspendue à la vente des lots (Zone d'aménagement) : le retard dans l'émergence de ces bâtiments peut provoquer un fonctionnement du réseau de chaleur et des générateurs en sous régime pendant plusieurs années, situation entamant les performances attendues à la fois d'un point de vue technique, environnemental et économique.

Evolution des usages :

Par exemple dans le cas de projet sur un process industriel, il est important de prendre en compte l'impact de l'arrêt de certaines utilités consommatrices de chaleur sur le bon fonctionnement des générateurs. Autre exemple, dans le cas d'un réseau de chaleur associant du tertiaire public et privé, il est important de sécuriser le risque d'arrêt d'activité de certains abonnés significatifs (délocalisation d'hôpital, fermeture d'espace commercial...).

Amélioration des dépenses énergétiques :

La priorité de la transition énergétique étant la réalisation d'économies d'énergie, le potentiel de sobriété sur des bâtiments à chauffer doit donc être pris en compte dans le dimensionnement. Ceci est d'autant plus important lorsque les bâtiments à chauffer sont soumis à des obligations particulières (par exemple au décret tertiaire).



Recommandations :

Le prévisionnel des besoins doit donc prendre en compte le risque d'une mauvaise évaluation des besoins à venir. Plusieurs leviers existent pour cela : soit cela passe par des choix techniques comme la mise en cascade de chaudières (bi-énergie ou bois) afin de sécuriser le respect des minimums techniques, soit il peut être réservé un potentiel d'extension des besoins en limitant le périmètre du projet dans un premier temps.



Exemples :

- L'abaissement du minimum technique du générateur est la priorité. Pour commencer, cela nécessite une analyse de la monotone des appels de puissance, puis le fractionnement de la puissance bois par une cascade de chaudières bois avec symétrie ou asymétrie de puissance selon le profil des consommations.
- La réalisation d'une branche du réseau de chaleur peut être mise en attente de la réalisation d'économies d'énergie (donc d'une baisse des appels de puissance) sur les bâtiments raccordés avec la première tranche du réseau de chaleur.



Quand appliquer ces recommandations ?

Ce diagnostic et ces conseils peuvent relever de l'étude de faisabilité ou de la phase diagnostic de la mission de maîtrise d'œuvre. Il sera important de conserver ces hypothèses à l'esprit lors de la phase de commercialisation d'un réseau de chaleur par exemple afin de mettre les clauses nécessaires à toute évolution dans les contrats de raccordement.

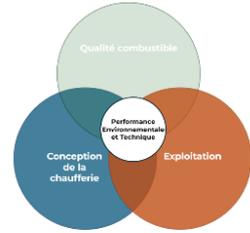


Quels outils existent ?

- Monotone d'appel de puissance
- L'AGEDEN décrit les raisons de l'écart entre performance réelle et prévision d'un bâtiment dans cet article : **AGEDEN. (s.d.). *Performance réelle des bâtiments publics : usage.*** <https://www.ageden38.org/performance-reelle-batiments-publics/usage/>
- **Programme PROFEEL. (2023).** *Guide : Impact des choix de conception sur la performance énergétique des générateurs de chauffage en habitat collectif.* <https://www.proreno.fr/documents/impact-des-choix-de-conception-sur-la-performance-energetique-des-generateurs-de-chauffage-en-habitat-collectif>
- **Programme PROFEEL. (2019).** *Schémathèque : Appareils de chauffage aux granulés en habitat individuel.* <https://www.proreno.fr/documents/schematheque-appareils-de-chauffage-aux-granules-en-habitat-individuel>
- **Programme PROFEEL. (2021).** *Guide : Changement du générateur de chauffage – Impacts du dimensionnement (Habitat individuel).* <https://www.proreno.fr/documents/changement-du-generateur-de-chauffage-impacts-du-dimensionnement-habitat-individuel>
- **Programme RAGE. (2015, 17 décembre).** *Guide : Les chaufferies au bois.* <https://www.proreno.fr/documents/les-chaufferies-au-bois>

3.1.4 Faire des choix techniques en adéquation avec les compétences d'exploitation disponibles

La mise en place d'une chaufferie bois implique de nouvelles compétences, du temps supplémentaire, potentiellement des astreintes ou des interventions à une fréquence ou des horaires inhabituels. Il est donc incontournable de prendre en compte les compétences disponibles dans l'étape de dimensionnement et le choix du mode de gestion.



Constat :

Il existe plusieurs solutions pour exploiter une chaufferie : soit avec des compétences internes appuyées par un contrat de maintenance avec un tiers, soit sans compétences existantes mais avec une externalisation complète. Il est important d'aborder le sujet des moyens disponibles pour l'exploitation de cet équipement au stade de l'étude de faisabilité pour diriger le maître d'ouvrage vers la solution la plus adaptée et l'inciter à se préparer. Les choix faits sont la plupart du temps liés aux habitudes de la structure qui porte le projet et aux compétences existantes. 2 exemples ci-dessous :

- Une commune sans chauffagiste préférera la plupart du temps réaliser les opérations de premier niveau et avoir le soutien d'une entreprise de maintenance, voire déléguer l'ensemble de l'exploitation.
- Une entreprise dotée d'un service maintenance peut envisager la montée en compétence pour conduire un nouvel équipement. Une entreprise qui a un fort besoin de réactivité (chaufferie process) peut faire le choix d'équipements qui peuvent être réparés en interne grâce à un stock de pièces disponibles sur place.

Les choix techniques faits au moment du dimensionnement et de la conception devront donc pouvoir être mis en application et contrôlés lors de la phase exploitation pour atteindre les performances attendues : réglage de cascade, entretien, arrêt estival, choix de combustible, régulation des circuits de chauffage...



Recommandations :

Lors de la phase d'étude il est important de recenser les compétences disponibles ou atteignables par les personnes en charge de l'exploitation. L'idéal est de les associer aux choix techniques pour leur permettre de s'impliquer plus facilement ensuite, avec une bonne compréhension du fonctionnement envisagé et de la réactivité attendue.



Exemples :

- Pour une puissance nominale donnée, il existe plusieurs technologies de chaudières appelant des compétences de maintenance différentes (foyer volcan / foyer à grilles mobiles).
- Sur une gamme de chaudière, il existe des seuils de puissance déclenchant le passage d'une technologie à une autre. Il est important d'avoir connaissance de ces seuils pour faire les bons choix techniques : en cas de compétences insuffisantes pour un palier de puissance supérieur, mieux vaut sous-traiter ou rester sous le palier de puissance inférieur et perdre quelques points de taux de couverture, tout en assurant une qualité d'exploitation à la hauteur des compétences en place.

En phase conception en avant-projet, le regard des équipes techniques doit permettre d'affiner les plans en prenant en compte sur la gestion des flux : livraison de bois (zone de retournement, visibilité, etc...), maintenance et démontage (dégagements disponibles etc...),

manutention des pièces ou des cendriers (ergonomie etc.).

Enfin, il est aussi important d'avoir cette recommandation à l'esprit dans le choix du mode de gestion du projet.



Exemples :

➤ Dans le cas d'une régie indirecte où l'exploitant sera recruté pour conduire l'équipement, le contrat peut être mis en place dès la phase travaux de façon à permettre la présence du futur exploitant *a minima* dans les réunions de chantier.

➤ Le marché global de performance est une solution pour assurer la bonne articulation entre l'étape de conception et la mise en adéquation des compétences d'exploitation nécessaires.



Quand appliquer ces recommandations ?

Les choix techniques en adéquation avec les compétences d'exploitation disponibles doivent être initiés dès la faisabilité (présentation des différentes solutions et recensement des compétences) et renforcés au stade conception (association des futurs exploitants aux choix techniques). Ces choix doivent aussi être transmissibles (et éviter les configurations trop complexes) en cas d'évolution de l'organisation en place (remplacement de personnel).



Quels outils existent ?

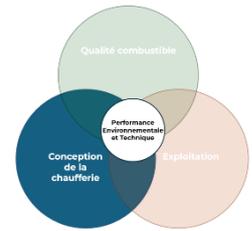
- Arbre de décision sur les modes de gestion : **CIBE. (2013).** *Modes de gestion.* <https://cibe.fr/modes-de-gestion/>
- **ADEME Poitou-Charentes (2012).** Liste des opérations de maintenance à alimentation automatique : <https://cibe.fr/wp-content/uploads/2017/02/Cahier-des-charges-de-maintenance.pdf>
- Guide silo FIBOIS avec recommandation sécurité au travail de la CARSAT : **FIBOIS. Ardèche Drôme (2015).** *Guide technique pour concevoir et dimensionner en toute sécurité un silo de chaufferie bois.* <https://cibe.fr/documents/guide-technique-concevoir-dimensionner-toute-securite-silo-de-chaufferie-bois/>
- Formation Adoboïs, formation des relais régionaux à la maintenance des chaufferies bois : **Metrol. (s.d.).** *Formation Adoboïs : formation des relais régionaux à la maintenance des chaufferies bois.* <http://www.metrol.fr/adoboïs/>
- **Programme RAGE. (2014).** *Guide : Installations d'eau chaude sanitaire – Confort, prévention des risques et maîtrise des consommations.* <https://www.proreno.fr/documents/installations-deau-chaude-sanitaire-confort-prevention-des-risques-et-maitrise-des-consommations>

3.1.5 Limiter les sources d'arrêts techniques injustifiés des chaudières bois



Constat :

Deux types d'arrêts involontaires possibles d'une chaudière bois : l'arrêt **thermostatique** qui est lié à un appel de puissance insuffisant sur la chaudière et l'arrêt **technique** qui est une interruption liée à une panne sur un périphérique ou un manque de combustible.



Au-delà de dégrader le taux de disponibilité de la solution bois et de limiter son taux de couverture, un arrêt entraîne une baisse en température puis un redémarrage du générateur donc une altération des performances ponctuellement.

Nous n'aborderons pas le sujet de l'arrêt thermostatique qui sera traité dans la fiche hydro-accumulation (§ 3.1.6). Il existe de nombreuses raisons pour lesquelles une installation peut être mise en arrêt technique involontaire, notamment des raisons de sécurité, généralement justifiées. Cependant, il est possible de limiter les sources d'arrêts liés à des problèmes de conception ou de maintenance préventive non ou mal effectuée.



Recommandations :

Les bons dimensionnements du silo et des systèmes de décendrage, ou encore la mise en place d'équipements de ramonage automatique sont autant de points essentiels pour éviter des arrêts techniques évitables.



Exemples :

- Le dimensionnement de silo : suivre les règles de l'art est nécessaire. Il est notamment important de prévoir un stock tampon entre deux livraisons.
- La capacité de décendrage : Devoir interrompre le bon fonctionnement d'une chaudière au moment du décendrage n'est pas acceptable. Pour ce faire, il est judicieux d'avoir constamment un cendrier supplémentaire disponible pour assurer la rotation et prendre le temps de vidanger le cendrier plein.
- Le ramonage automatique : faire l'économie du ramonage automatique au moment de l'installation n'est pas un calcul pertinent car l'absence de dispositif entraîne des arrêts fréquents (Figure 6), ce qui augmente l'indisponibilité de la chaudière et dégrade le taux de couverture bois. De plus, cela entraîne des phases d'extinction et de redémarrage potentiellement préjudiciable à l'atteinte des performances environnementales. Il existe différents degrés de ramonage automatique des conduits de fumées allant du décolmatage par jets d'air comprimé, jusqu'au lustrage avec des brosses mises en rotation dans les échangeurs. Ces différentes techniques permettent de réduire, voire supprimer les ramonages manuels nécessaires.

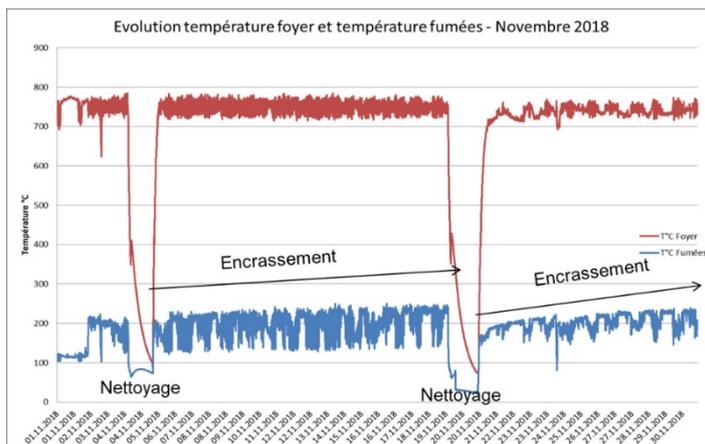


Figure 6 : Courbe de suivi de température de fumées et impact de l'absence de dispositif de ramonage sur les arrêts chaudière (Source AILE)



Quand appliquer ces recommandations ?

En phase conception et exploitation.

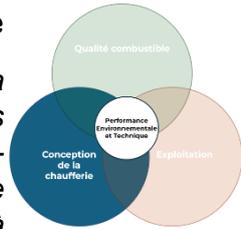


Quels outils existent ?

- Différents guides de conception existent :
- **FIBOIS Ardèche Drôme (2015).** *Guide technique pour concevoir et dimensionner en toute sécurité un silo de chaufferie bois.* <https://cibe.fr/documents/guide-technique-concevoir-dimensionner-toute-securite-silo-de-chaufferie-bois/>
- **OPTIWOOD. (2020).** *Guide OPTIWOOD.* <https://optiwood.org/fr/>
- La prise de conseils auprès des fabricants de chaudières
- **Programme RAGE (2015)** *Guide : Les chaufferies au bois* <https://www.proreno.fr/documents/les-chaufferies-au-bois>

3.1.6 Mettre en place du stockage thermique bien dimensionné

Rappel : « Le stockage d'énergie est le terme général qui ne précise pas la nature ou la puissance. Ainsi le stockage d'énergie dans le sol (via des puits ou encore aquifère) est un stockage hebdomadaire, mensuel voir inter-saisonnier. La notion de « tampon » est généralement associée à une échelle de temps plus courte, de l'ordre de quelques dizaines de minutes à quelques heures au maximum, pour « tamponner », s'est à dire amortir des fluctuations. Aussi le stockage tampon [...] inclut une part de stockage thermique, dont l'objectif principal de cette hydro-accumulation est de lisser le besoin et donc de maintenir la chaudière à un meilleur pourcentage de sa puissance nominale. » Stockage tampon hydraulique, Retour d'expériences, CIBE, diffusion prévue en 2025.



Constat :

Le projet de recherche ACIBIOQA mené par l'ADEME a montré que les émissions de poussières et de CO étaient plus importantes lors des fonctionnements à faible charge et lors des phases d'extinctions/redémarrages des chaudières.

En parallèle on constate l'absence fréquente de stockage tampon dans les petites et moyennes chaufferies, malgré ses avantages :

- Réduire le nombre de cycles d'allumage-extinction (courts cycles) :
 - Délais de relance (délai de soutirage sans chauffage car la chaudière fait monter sa température de retour en priorité).
 - Traversée du point de rosée (à environ 55°C) à l'extinction de la chaudière qui peut générer de la condensation, et donc de la corrosion. Cela confère au corps de chauffe une durée de vie limitée.
- Optimiser le fonctionnement de la chaudière (durée de fonctionnement et taux de charge, prolongement du fonctionnement estival).

L'absence de ballon peut être liée à l'absence de recommandation en la matière (sur les anciennes installations en particulier), ou au souhait de réduire le budget du projet.

Lorsqu'il est présent, il peut aussi être sujet à des dysfonctionnements qui réduisent son utilité (problème de régulation, problème de stratifications).



Recommandations :

L'hydro-accumulation est un outil qui peut avoir plusieurs intérêts lorsque la conception et l'exploitation sont bien pensées. Pour cela, il est nécessaire d'impliquer un concepteur compétent et expérimenté sur le sujet, qui prenne à la fois en compte les contraintes de fonctionnement des chaudières (point de vue du chaudiériste) et l'analyse fonctionnelle de la chaufferie (points de vue du maître d'œuvre et de l'exploitant).

Pour les chaufferies collectives, petits réseaux de chaleur, bâtiments hospitaliers, centres aquatiques ou sportifs, lorsque le budget ne permet pas une étude détaillée, il est possible d'utiliser des ratios de dimensionnement (ex. 30 L/kW pour chaudières bois < 200 kW). Pour les grandes puissances (>2 MW), il est nécessaire d'intégrer des solutions adaptées aux besoins spécifiques du réseau (hydro-accumulation pour écrêter les pics de puissance, réseaux urbains ou industriels nécessitant des volumes tampons importants).

Bien souvent le dimensionnement est un compromis entre les exigences techniques et budgétaires du projet. Voici un recueil de conseils montrant la richesse de paramètres à prendre en compte.

Dimensionnement :

- Calculer le volume hydro-accumulation en fonction des besoins spécifiques (court-cycles, écrêtage de puissance, dynamique des appels).
- Respecter les ratios recommandés (ex. 20 à 50 L/kW selon les caractéristiques du réseau).
- Stratification : Utiliser des ballons allongés (rapport hauteur/diamètre ≥ 2 , idéalement 3). Si la stratification n'est pas recherchée (cas de l'hydro-accumulation), il n'y a pas de recommandations particulières pour ces dimensions.
- Installer des brise-jets pour éviter le mélange des températures.
- Penser à l'encombrement total du ballon au sol comme en hauteur en chaufferie (soupape de sécurité, vidange, matelas isolant).
- Réseaux avec forte inertie ou appels de puissance soudains : surdimensionner le ballon d'hydro-accumulation (ex. 50 L/kW pour bois déchiqueté).

Régulation :

- Installer au moins trois sondes de température pour piloter efficacement la charge et la décharge du ballon.
- Équilibrer les débits entre production et distribution pour éviter les pertes de performance.

Choix du montage :

- Privilégier un montage en série des ballons pour maximiser la stratification.
- Si la mono énergie bois est choisie, s'orienter vers deux chaudières en cascade avec l'une répondant à 67% du besoin et la seconde aux 33% restants (à préciser en fonction du cas, de la monotone et de la puissance minimale).
- Si un appoint est prévu, penser à respecter le circuit suivant :

RETOUR RESEAU → CHAUDIERE BOIS → BALLON D'HYDRO-ACCUMULATION → CHAUDIERE APPOINT
(AVEC BY PASS) → DEPART RESEAU

Maintenance :

- Prévoir des vannes pour isoler les ballons en cas de dysfonctionnement.
- Vérifier régulièrement la stratification et l'équilibrage des débits.

Budget :

- Certains fournisseurs déplorent devoir économiser sur le volume du ballon d'hydro-accumulation pour s'aligner sur une offre concurrente. Eviter de sous-dimensionner le ballon d'hydro-accumulation pour des raisons financières, car cela peut nuire à la performance globale.



Quand appliquer ces recommandations ?

Ces éléments sont à prendre en compte dès la phase faisabilité et affirmée en phase avant-projet sommaire car l'impact sur les dimensions du local chaufferie est important et le choix peut aussi influencer les puissances des générateurs et donc le budget de l'opération.



Quels outils existent ?

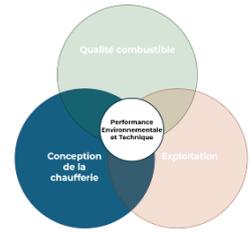
- **L'Édifice. (2025).** *Script de calcul du volume du ballon tampon pour l'hydro-accumulation.* <https://ledifice.com/script-de-calcul-du-volume-d-un-ballon-tampon-pour-l-hydro-accumulation>

- **Programme RAGE. (2013, 1er février).** *Guide : Conception et dimensionnement des volumes tampons.* <https://www.proreno.fr/documents/conception-et-dimensionnement-des-volumes-tampons>
- **CIBE – Journée technique - Stockage Thermique : Points clés pour optimiser conception et exploitation dans une installation biomasse – 24/11/2024 -** <https://cibe.fr/journees-techniques/jt-stockage-thermique/>



Pour aller plus loin : Méthode de conception d'un stockage thermique ([ANNEXE I](#))

3.1.7 Le dimensionnement d'une installation doit être cohérent du silo au radiateur, simple et compréhensible



Constat :

Le graphique ci-dessous est tiré de l'enquête menée par AILE en 2025 sur un échantillon de 24 chaufferies. Il met en évidence un rendement moyen plus élevé sur les installations 100% bois équipées d'une cascade de deux chaudières (2 cas) par rapport à la moyenne des installations mixtes bois avec appoint (21 cas qui présentent une forte variabilité). Sans tirer de conclusion hâtive, chaque installation étant un cas particulier, cet exemple illustre l'influence du dimensionnement et des choix techniques sur les performances (ici le rendement) des installations.

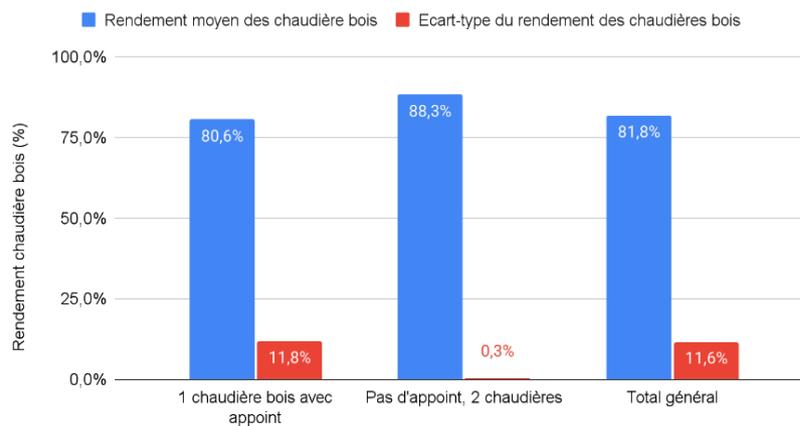


Figure 7 : Etat des lieux du rendement des chaudières bois déchiqueté en fonction du système installé

L'autre constat est la diversité des montages observés dans les projets de chaufferies : au niveau du dimensionnement des générateurs (bi-énergie ou pas, chaudière en cascade, asymétrie de puissance, avec un nombre d'heures équivalent pleine puissance (HEPP) élevé ou pas), du positionnement de l'appoint sur le circuit primaire, du mode de fonctionnement de l'hydro-accumulation (en décharge ou pas), avec bouteille de découplage ou pas, des pompes de charges etc...

Enfin, ces orientations techniques sont généralement données en phase conception et servent à la rédaction, sous forme de schémas de principe, des cahiers des charges de consultations des entreprises à qui se verront confier le plus souvent une mission de dimensionnement qui sera validée dans le cadre de la mission d'exécution du maître d'œuvre. Il y a donc plusieurs intervenants dans cette étape de conception et de dimensionnement qui peut générer des interfaces et compliquer le rôle de conseil de chacun (par exemple, l'installateur est contraint d'intervenir sur un montage prescrit par le maître d'œuvre auquel il n'est pas familier, ou un fournisseur d'équipement devra régler sa chaudière pour un nombre HEPP ou un ratio d'hydro-accumulation plus important que ses prescriptions habituelles).

La diversité des montages possibles et la complexité dans laquelle ils sont parfois construits (exemple : une proposition d'un bureau d'étude qui se trouve adaptée par un installateur) aboutit à l'absence de standardisation des montages et dimensionnements en chaufferie et la complexité à former les exploitants pour appréhender cela et prendre en main le fonctionnement des installations de façon optimale.



Recommandations :

Le dimensionnement d'une installation est une étape complexe qui doit être menée en parfaite cohérence du silo au radiateur. Il est donc important de s'assurer dans la phase de conception que l'ensemble des parties soit diagnostiquées pour permettre un dimensionnement adapté.



Exemples :

La phase de mise au point doit pouvoir s'appuyer sur une analyse fonctionnelle décrivant le fonctionnement de l'ensemble de l'installation (mécanique, hydraulique, électricien, régulation) et permettant aux différents intervenants d'échanger. **Cegibat. (2022).** [Analyse fonctionnelle installation chauffage ECS obligatoire.](https://cegibat.grdf.fr/reponse-expert/analyse-fonctionnelle-installation-chauffage-ecs-obligatoire) <https://cegibat.grdf.fr/reponse-expert/analyse-fonctionnelle-installation-chauffage-ecs-obligatoire>

- Il est recommandé de ne pas allouer l'appel d'offre en sortant la chaudière du lot chauffage : ceci facilite la coordination des différents intervenants (chauffagiste, électricien, chaudiériste) s'organisant pour répondre sur un lot chauffage + chaudière.
- Le Marché Public Global de Performance est une solution, pour les projets de plus d'1GWh de limiter les interfaces entre les intervenants afin de privilégier une installation conçue en lien étroit avec le futur exploitant.



Quand appliquer ces recommandations ?

Ces recommandations sont à prendre en compte dans la définition de la mission du maître d'œuvre (mission dimensionnement, mission EXE etc...) et dans le cahier des charges du lot chauffage.



Quels outils existent ?

- **CIBE** - [Synthèses des recommandations par typologies de stocks tampon \(2016-APR-1\)](#) – 2016
- **CIBE** – [Journée technique - Stockage Thermique : Points clés pour optimiser conception et exploitation dans une installation biomasse – 24/11/2024](#) - <https://cibe.fr/journees-techniques/jt-stockage-thermique/>
- **Programme RAGE. (2015).** [Guide : Circuits hydrauliques – Composants et règles de conception.](#) <https://www.proreno.fr/documents/circuits-hydrauliques-composants-et-regles-de-conception>

3.1.8 Adapter les équipements de filtration et de mesure



Constat :

La qualité du combustible, notamment l'humidité du bois a un impact non négligeable sur la combustion. D'autre part, les fumées de combustion du bois contiennent des gaz (CO₂, CO, vapeur d'eau) et des particules (suies, COV, HAP) qui nécessitent un traitement pour respecter les normes environnementales.

Une mauvaise combustion ou un excès de particules peut provoquer des risques d'incendie ou une pollution accrue.

Les filtres multi-cyclones seuls peuvent ne pas être suffisants pour atteindre les performances d'émissions attendues au-delà de 500kW. Les filtres à manches sont particulièrement performants pour les petites particules, tandis que les électrofiltres sont également efficaces mais peuvent nécessiter des ajustements pour éviter les arrêts intempestifs. Enfin, d'autres solutions peuvent être envisagées telles que les filtres à manches céramiques qui assurent une bonne stabilité thermique, ou les condenseurs/laveurs qui permettent une récupération de l'énergie en parallèle du lavage des fumées.



Recommandations :

La mesure de l'humidité du combustible doit être effectuée à l'aide d'équipements adaptés tels que des étuves, afin de garantir une bonne qualité de combustion. Pour aller plus loin dans l'optimisation de l'exploitation, il est recommandé d'installer des détecteurs d'humidité permettant d'ajuster en continu les paramètres de combustion, ce qui améliore à la fois les performances énergétiques et l'impact environnemental. Le suivi de la granulométrie ou des taux de fines permettent une exploitation également d'autant plus adaptée.

L'intégration d'une sonde Lambda est essentielle pour réguler la combustion et assurer la qualité des fumées. Celle-ci doit être positionnée correctement, idéalement avec un plongeur incliné à 45° et à contre-courant des gaz. L'utilisation d'huile ou de pâte thermique est conseillée pour améliorer la précision des mesures des sondes de température d'eau, équipées de doigts de gants.

Il est important de s'assurer que la cheminée utilisée pour rejeter les fumées à l'atmosphère soit suffisamment haute et en adéquation avec la réglementation ou les recommandations de l'ADEME, afin de limiter l'impact des émissions sur la santé des riverains.

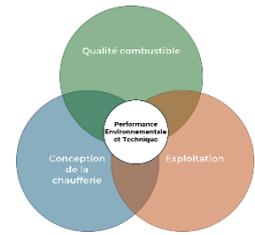
Enfin, pour garantir un suivi régulier et sécuriser l'installation, il convient d'équiper les conduites d'une trappe de mesure dédiée aux tests annuels d'émission, ainsi que de prévoir un piège à escarbilles afin de retenir les particules lourdes incandescentes et prévenir les risques d'incendie.



Conseils :

Il est important de caractériser le combustible utilisé afin d'adapter correctement les équipements de filtration. Cette étape permet de choisir les systèmes les plus efficaces et d'assurer une combustion optimisée pour la biomasse disponible.

Le bon fonctionnement des équipements nécessite un entretien régulier : le dépoussiéreur doit être contrôlé et nettoyé chaque mois, tandis que l'extracteur de fumée nécessite une vérification trimestrielle. L'électrofiltre, en particulier, doit être entretenu rigoureusement pour éviter les arrêts imprévus et garantir une filtration continue.



Enfin, il convient de limiter les cycles d’extinction et de redémarrage, car le filtre à manches est by-passé par sécurité, ce qui dégrade les performances environnementales de l’installation. L’électrofiltre peut aussi être by-passé pour ne pas s’encrasser anormalement avec des dépôts de type condensats/goudrons.



Quand appliquer ces recommandations ?

Lors de la phase de dimensionnement, il est possible d’orienter le projet vers les moyens de filtration les plus adaptés au contexte : selon les règles d’éligibilité aux aides publiques et la réglementation (ICPE 2910 A), des valeurs limites d’émissions différentes sont en vigueur et dépendent de la puissance des générateurs installés :

Tableau 1 : Comparaison des valeurs limites d’émissions en fonction de la puissance installée

Puissance chaudière	Poussières	CO	NOx	SO ₂
< 400 kW	Pas de VLE (valeurs indicatives + contrôles périodiques)	-	-	-
400 kW – 1 MW	≤ 150 mg/Nm ³ (recommandé)	≤ 375 mg/Nm ³ (PPE Île-de-France)	-	-
1 – 5 MW	50 mg/Nm ³	250 mg/Nm ³	500 mg/Nm ³ (300 en 2025)	200 mg/Nm ³
5 – 20 MW	30 mg/Nm ³	250 mg/Nm ³	300 mg/Nm ³	200 mg/Nm ³
20 – 50 MW	30 mg/Nm ³	250 mg/Nm ³	300 mg/Nm ³	200 mg/Nm ³

Sources : Directive européenne MCP (2015/2193/UE) / Arrêtés du 25 juillet et 30 juin 2009 / ADEME & CIBE. (2024, 18 mars). *Enjeux de la pollution de l’air et impact des petites chaufferies biomasse* [Webinaire]. https://cibe.fr/wp-content/uploads/2024/03/2024-03-19-Enjeux-QA-et-impact-petites-chaufferies-biomasse_ADEME-CIBE-Diff-V2.pdf

Les règles du Fonds Chaleur sont plus exigeantes pour les installations hors ICPE.

En effet, depuis 2022, le Fonds Chaleur fixe à 50 mg/Nm³ (à 6% d’O₂) les valeurs limites d’émission des particules pour les chaudières dès 500 kW. Ainsi bien que la majorité des petites installations en fonctionnement, ne sont pas équipées de système de filtration, à compter de 2026, le Fonds Chaleur devrait imposer des critères relatifs au respect des valeurs limites d’émission pour toutes les installations dès 150 kW.

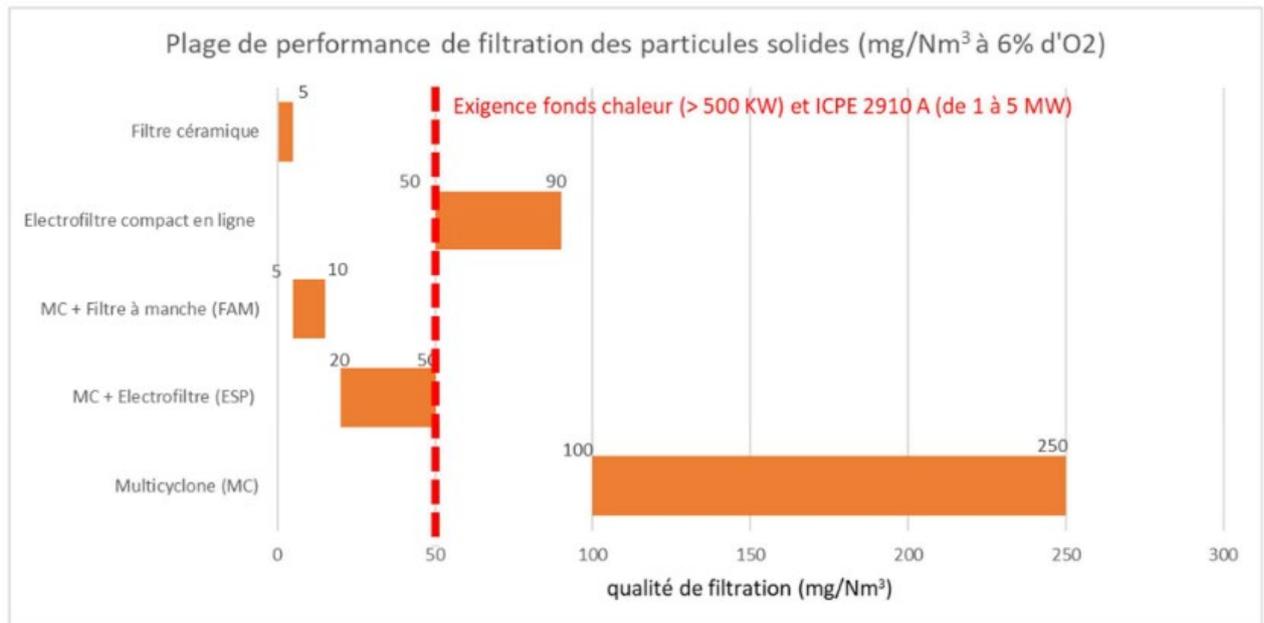


Figure 8 : Comparaison des performances de filtration des principaux équipements de filtration de chaufferies biomasse (Source : ADEME. (2023, 30 juin). Émissions atmosphériques des chaufferies bois de puissance inférieure à 1 MW

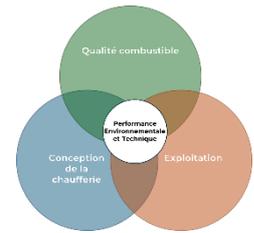


Quels outils existent ?

- **ADEME. (2014).** *Évaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse.* <https://librairie.ademe.fr/energies/2145-evaluation-des-performances-energetiques-et-environnementales-de-chaufferies-biomasse.html>
- **ADEME Poitou-Charentes. (2013).** *Guide de bonnes pratiques des chaufferies bois à alimentation automatique (granulés et bois déchiqueté).* <https://cibe.fr/wp-content/uploads/2017/02/Guide-de-bonnes-pratiques.pdf>
- **Association Savoyarde pour le Développement des Énergies Renouvelables (ASDER). (2019).** *Guide méthodologique : Suivre sa chaufferie bois.* <https://cibe.fr/documents/suivre-chaufferie-guide-methodologique-chaufferies-petite-moyenne-puissance/>
- **CIBE. (2016, 16 mars).** *Émissions atmosphériques : évolution de la réglementation et solutions pour les moyennes puissances (Pinst < 2 MW). Salon Bois-énergie – Nancy.* <https://cibe.fr/wp-content/uploads/2023/09/emissions-atmospheriques-petites-chaufferies-bois-Synthese.pdf>

3.2 En phase réception

3.2.1 Préparer l'étape de réception



Constat : Cette étape est importante d'un point de vue contractuel car elle marque la fin du chantier avec la levée des réserves et la possibilité pour le maître d'ouvrage de prendre possession des équipements. Mais elle est aussi importante pour valider l'atteinte des performances car à partir de cette étape, le maître d'ouvrage aura en charge, de façon directe ou indirecte (contrat d'exploitation), son exploitation et devra valider une bonne compréhension de son fonctionnement pour faciliter la prise en main. Or nous constatons que la durée de prise en main est souvent longue avec parfois une première saison de chauffe peu concluante.

Cela peut s'expliquer en partie par un manque de préparation : l'absence d'implication d'un fournisseur de combustible ou de l'opérateur de maintenance en amont peut déboucher sur des imprévus : difficulté de réglage des organes de convoyage, problème d'accessibilité à la maintenance, écart entre les hypothèses de dimensionnement et les possibilités de réglages...

Une autre explication est possible : dans une majorité de cahier des charges, la réception est faite après une mise en service statique, le temps utile à une mise en service dynamique étant négligés.



Recommandations :

La réception est prononcée une fois que les réserves identifiées sont levées. Les visites d'Opération Préalables à la Réception (OPR) sont programmées pour faire cet état des lieux. Cette étape peut être préparée par le maître d'ouvrage potentiellement avec l'appui d'un animateur bois-énergie locale et dans tous les cas avec le guide réception proposé par l'ADEME.

Le DOE, dossier des ouvrages exécutés, n'est pas facilement accessible et le constat est fait qu'il est rarement prêt pour l'étape de réception et peu utilisé ensuite. Or il contient les documents utiles pour comprendre l'installation avec les prescriptions nécessaires au bon fonctionnement. Ces supports doivent être mis en exergue lors de la formation à la prise en main comme tout autre outil de travail (rapport de réglage, analyse fonctionnelle, hypothèse de dimensionnement, prescriptions de maintenance...). Sans cela, la conduite de chaufferie se fera à l'aveugle, occultant les enjeux de performances.

Prévoir un temps suffisant en mission d'Assistance aux Opérations de Réception (AOR) afin que la maîtrise d'œuvre puisse utiliser toutes ses compétences pour accompagner le porteur de projet lors de la réception des travaux et pendant la période de garantie de parfait achèvement.



Quand appliquer ces recommandations ?

La phase de réception doit être préparée : la préparation s'anticipe par le recrutement du fournisseur de bois et de l'exploitant afin de les associer à l'identification des réserves potentiels. L'animateur bois-énergie peut accompagner en participant à une phase de pré-réception qui permettra d'identifier les questionnements que le porteur de projet pourra poser au maître d'œuvre.



Quels outils existent ?

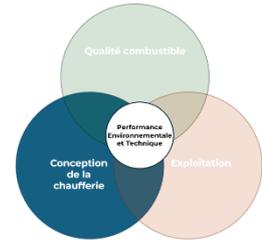
ADEME (Direction régionale Poitou-Charentes). (2020, novembre). Guide de réception des chaufferies bois à alimentation automatique (bois déchiqueté)
<https://aile.asso.fr/wp-content/uploads/2020/11/Guide-de-reception-bois-dechiquete.pdf>

3.2.2 Suivre la mise en service et optimiser les réglages



Constat :

La réception des équipements est bien souvent limitée à une mise en service statique et l'édition d'un PV de réception attestant de la conformité des travaux au cahier des charges décrivant l'installation. La plupart du temps, elle est suivie immédiatement au démarrage de l'installation. Dans des cas plus rares le démarrage a lieu quelques semaines ou mois plus tard (réception entre deux périodes de chauffe) ce qui ne permet pas d'évaluer le bon fonctionnement de l'installation à la réception.



Cette phase de mise en service est suivie par l'étape de prise en main de l'exploitant : formation, apprentissage, puis gestion. On pourra considérer l'installation comme véritablement réceptionnée lorsqu'elle aura pu justifier de l'atteinte des performances.

Cette durée de prise en main est plus ou moins longue ; marquée par de moindres performances techniques et, par ricochet, environnementales et économiques, c'est une période sensible qui doit être menée sur la durée la plus courte possible. Dans une installation bien conçue, sa réussite tient à la qualité des réglages et de la formation des opérateurs. Le constat est récurrent : si on peut faire l'hypothèse que les réglages sont convenablement réalisés par les entreprises de travaux, les agents en charge de la maintenance bénéficient la plupart du temps d'une journée de formation pour la prise en main de l'installation (par le distributeur de chaudière bois). Cette étape nécessaire n'est pas suffisante pour une prise en main complète.



Recommandations :

Une façon d'optimiser la mise en service et la prise en main est de prendre le temps nécessaire pour améliorer la qualité des réglages. Une mise en service dynamique conduite avec l'appui du maître d'œuvre et démarrée après la réception statique est conseillée pendant une période définie au cahier des charges et jugée suffisante pour établir un premier bilan énergétique sur un cycle de fonctionnement représentatif de l'ensemble à chauffer.

Pendant cette période, un suivi est réalisé : les données sont consignées et comparées aux objectifs, l'ensemble des acteurs impliqués dans le projet se rendent disponibles pour suivre le respect des engagements et intervenir au besoin sur des réglages. L'exploitant présent aussi sera acteur dans cette étape et en profitera pour accélérer la prise en main. Le coût engendré par cette étape supplémentaire au cahier des charges peut être largement compensé par l'absence de perte de disponibilité des chaudières bois ou l'absence de perte de rendement.



Quand appliquer ces recommandations ?

Dès la phase de rédaction du cahier des charges de maîtrise d'œuvre, en demandant la conduite d'une phase de mise en service dynamique.



Quels outils existent ?

L'AGEDEN développe bien l'intérêt de la mise en service dynamique dans cet article :

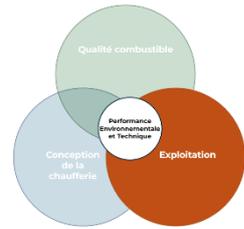
- **AGEDEN. (s.d.).** *Performance réelle des bâtiments publics : réception et mise en service.* <https://www.ageden38.org/performance-reelle-batiments-publics/reception-mise-service/>

La filière solaire thermique met l'accent sur le sujet pour améliorer la performance du parc au travers du guide SOCOL. Cela pourrait apporter des enseignements qui pourraient être utiles à la filière bois-énergie :

- **SOCOL. (2021).** *Guide technique pour la mise en service des installations solaires thermiques.* <https://atlansun.fr/ressources/solaire-thermique-livret-technique-pour-la-mise-en-service-statique-et-dynamique/>
- **Programme RAGE. (2014).** *Guide : Gestion technique du bâtiment – Bonnes pratiques.* <https://www.proreno.fr/documents/gestion-technique-du-batiment-bonnes-pratiques>

3.3 En phase exploitation

3.3.1 Définir le rôle de chaque opérateur



Constat :

De nombreuses situations de dysfonctionnements ont pour origine un défaut de communication entre les acteurs : le fournisseur manquant de précision et le chauffeur-livreur de bois réalisant un mauvais adressage, le fournisseur livrant une qualité de bois inadaptée par mauvaise compréhension d'un CCTP, le concepteur dessinant un silo non livrable compte tenu des bennes existantes chez le fournisseur...

Tout au long de la conception et de la vie du projet, il y a des interfaces à gérer entre acteurs, la plupart du temps réglées par des contrats définissant tout ou partie des limites de prestations. Mais le manque d'interconnaissance entre acteurs freine la bonne appréhension du périmètre des actions de chacun et laisse apparaître quelques interfaces mal appréhendées : un exemple récurrent est le manque de prise en compte des dégagements utiles à la maintenance par les concepteurs ou la non prise en compte des hypothèses de fonctionnement utilisées en phase dimensionnement dans la réalisation des réglages par l'exploitant.



Recommandations :

Il est donc important de ne pas négliger l'échange entre acteurs, l'implications des exploitants et fournisseurs dans les phases de conception et de façon générale, l'établissement de document de cadrage définissant les rôles de chacun.



Exemple :

- Transmettre le mode d'emploi (l'analyse fonctionnelle doit rappeler les hypothèses de fonctionnement visées en phase conception) semble une évidence mais lorsque celui-ci est livré avec le DOE plusieurs mois après la mise au point de l'installation cela se révèle un handicap pour l'exploitant.
- Consigner les réglages est important dès la phase de réception afin d'éviter une dérive des paramètres de réglage (alternance des opérateurs, absence de rapport de réglage, affichage des consignes, ajustement des réglages (équilibre) en cas de modification du secondaire etc...).
- Enfin, éviter le doublon d'opérations ou l'oubli de certaines étapes de suivi ou d'entretien peut être tout aussi contre-productif. Une répartition des rôles entre conducteur de chaufferie et prestataire de maintenance peut aider à cette bonne coordination pour conduire aux bonnes performances de l'installation.



Quand appliquer ces recommandations ?

Tout au long de la vie de l'équipement, il est important que les renouvellements de personnel s'accompagnent d'un tuilage ou a minima d'une transmission de la documentation technique spécifique.



Quels outils existent ?

- **CRER. (2020).** Liste de points de contrôle pour l'entretien. Comité Régional de l'Énergie Renouvelable. <https://cibe.fr/wp-content/uploads/2020/10/2020-CRER-Points-de-contr%C3%B4le-Maintenance.pdf>

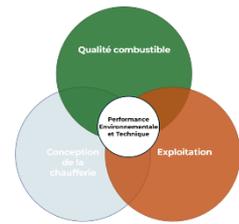
3.3.2 Contrôler la qualité du combustible



Constat :

Les chaufferies ne possèdent pas toutes d'équipements de mesure de l'humidité et/ou de la granulométrie (micro-onde, étuve, tamiseuse, etc...).

La granulométrie et le taux d'humidité sont des facteurs clés pour optimiser le pouvoir calorifique. Les variations de qualité selon l'origine du bois nécessitent un suivi rigoureux. En effet, la biomasse ayant poussé sur des sols pollués peuvent augmenter la concentration en chlore et provoquer des émissions de dioxines/furanes, des HCl anormalement élevées. Le bois consommé n'est pas toujours en adéquation avec la chaufferie. Il en résulte alors des écarts aux objectifs de performances voire des dysfonctionnements.



Non-conformité du combustible aux spécifications requises :

Si le combustible est trop humide, la combustion est de mauvaise qualité, le débit de fumées est trop important (en raison de l'eau contenue dans le combustible) et le rendement est dégradé. D'autre part, le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) massique d'un bois humide à 50% d'humidité (2,211 MWh/t) est de 50% inférieur à un bois à 15% d'humidité (4,233 MWh/t). Ainsi, pour la même quantité d'énergie utile, il faut deux fois plus de plaquettes à 50% que de plaquettes à 15% d'humidité.

A l'inverse, si le combustible est trop sec, la combustion est trop rapide, les fumées sont trop chaudes, ce qui peut entraîner des risques de vitrification des cendres sur la grille, des pertes de rendement, une usure prématurée de la grille et des réfractaires. Par exemple, pour un bois à 15% d'humidité, la température de combustion théorique est de l'ordre de 1400°C (sans recyclage de fumées ou oxygène en grand excès)

Granulométrie inadaptée :

Une granulométrie inadaptée peut engendrer des dysfonctionnements ou des dégradations du système de désilage et de convoyage du combustible. Une usure prématurée des appareils peut alors être observée. Dans certains cas, cela peut même obstruer les grilles et les entrées d'air, provoquant une mauvaise combustion et une dégradation du foyer. D'autre part, un taux de fines élevé peut augmenter significativement les émissions de particules dans les fumées.

Cendres et fumées de mauvaise qualité :

Outre une puissance calorifique plus faible et un bilan énergétique dégradé, un combustible trop humide produit des goudrons, des fumées noires, et augmente les émissions polluantes. Si le combustible est trop sec, cela peut entraîner des températures excessives, la formation de mâchefers, et des oxydes d'azote (NOx).

L'enquête 2025 qu'AILE a menée sur le parc de chaufferies bois breton aborde le rendement des chaudières biomasse en fonction du taux d'humidité du combustible :

La qualité du bois n'est pas systématiquement contrôlée et donc la quantité d'énergie équivalente pour ce bois n'est pas systématiquement connue. Certains quantifient le bois livré en mètre cube apparent, d'autres en tonnes et d'autres encore en MWh (le plus fiable).

Le rendement de la chaudière biomasse est calculé à partir des consommations données, de l'humidité du bois, de son essence et de la production déclarée. Les caractéristiques du bois nous permettent de calculer le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) du bois et donc les MWh potentiels en entrée de la chaufferie. On applique alors le ratio entre les MWh produits déclarés et les MWh produits par la chaufferie. Une marge d'erreur est possible sur cette donnée car l'humidité renseignée était souvent approximative (En supposant un écart de 5% sur l'humidité déclarée, on obtiendrait en moyenne un écart de rendement de 6.9%, soit $\pm 3.45\%$, ce qui reste précis).

Nous avons recensé des taux d'humidité variant de 8% à 42.3%. Le rendement global est de 85.1% \pm 3.7% (3 valeurs de rendement à 60% étant mises de côté). Ce constat est plutôt correct et en accord avec le rendement de 85% préconisé dans le Plan Bois Energie Bretagne. On constate que le rendement de la chaudière bois diminue en fonction du taux d'humidité du bois. Cela signifie que le taux d'humidité peut dégrader le rendement de la chaudière si elle n'est pas exploitée dans les bonnes conditions aucun combustible ne contenait plus de 45% d'humidité.

Malheureusement, l'humidité ne fait pas tout : les chaudières bois granulés étudiées avec un taux d'humidité du bois de 8% obtiennent des rendements très différents en fonction des installations variant entre 46,3% et 95.5%. Malgré un taux d'humidité faible, les rendements peuvent être médiocres si les chaudières sont mal exploitées ou si la conception a été mal réalisée.



Recommandations :

Le contrôle de la qualité du combustible est incontournable pour assurer la bonne qualité des cendres et des fumées. Maintenir un taux d'humidité autour de la préconisation du fabricant maximise le rendement de la chaudière. Pour ce faire, il est pertinent de réaliser des tests dans les 24 heures après prélèvement et livraison pour garantir la représentativité. Il est important de contrôler la granulométrie via un tamisage mécanique selon la norme NF EN ISO 17827.

A minima, il est essentiel de vérifier la texture et la couleur des cendres pour détecter des anomalies et adapter les réglages de combustion si nécessaire (température des fumées, ratio air/combustible). Si elles sont noires c'est que la combustion était incomplète. Si elles sont agglomérées alors la température dans le foyer est trop importante.



Parmi les retours d'expérience des animateurs, on recense des bonnes pratiques, dont les exemples ci-dessous :

➤ Imposer un cahier des charges au fournisseur :

Il est nécessaire de sensibiliser le fournisseur de biomasse aux spécifications requises (via le CCTP du marché d'approvisionnement), y compris avec des implications financières en cas de non-conformité. Refuser les livraisons ne respectant pas les critères de qualité (granulométrie, humidité, corps étrangers, etc...) permettra de préserver votre installation et de maximiser votre efficacité énergétique.

➤ Anticiper les commandes et contrôler le bois à la livraison :

Passez commande avant que le silo soit vide, surtout en période de forte demande vous permettra d'être serein en cas de refus de livraison pour non-conformité. Au moment de la livraison, utilisez une étuve (24h mais très précis) ou un micro-onde (30 minutes mais approximatif) pour mesurer l'humidité. Si vous n'en avez pas à votre disposition, vous pouvez également utiliser la méthode du seau pour calculer la densité (calculer la masse volumique du bois livré). Vous pouvez faire un contrôle approximatif avec un humidimètre. Afin d'éviter tout dysfonctionnement lié aux fines, aux queues de déchetage ou aux corps étrangers, prévoyez un entretien annuel du silo pour évacuer les indésirables.



Quand appliquer ces recommandations ?

- À chaque livraison de bois : Contrôler la qualité du combustible et refuser les livraisons non conformes. Remplir une fiche d'approvisionnement pour le suivi (date, fournisseur, taux d'humidité, observations).
- Tout au long de l'année : Ajuster les réglages de la chaudière en fonction de la qualité du bois livré et collaborer avec les fournisseurs pour stabiliser la qualité du bois livré.



Quels outils existent ?

- **CBQ+** : Le choix d'un fournisseur offrant une garantie de qualité de service et disposant des compétences et des moyens pour garantir la qualité de combustible attendu est le levier principale permis par la certification CBQ+. <https://chaleur-bois-qualite-plus.fr/>
- **Parc naturel régional du Morvan. (2015).** *Bois-énergie : Gestion d'une chaufferie plaquettes.* https://www.parcдумorvan.org/wp-content/uploads/2019/07/4pages_bois_energie_morvan_reduit.pdf
- **CIBE. (2014).** *Causes et remèdes aux dégradations de performances d'une chaudière biomasse.* <https://cibe.fr/documents/causes-remedes-aux-degradations-de-performances-dune-chaudiere-biomasse-2014-rex-4/>
- **OPTIWOOD. (2020).** *Guide OPTIWOOD.* <https://optiwood.org/fr/>
- **ADEME (Direction régionale Poitou-Charentes). (2013).** *Guide de bonnes pratiques des chaufferies bois à alimentation automatique (granulés et bois déchiqueté).* <https://cibe.fr/wp-content/uploads/2017/02/Guide-de-bonnes-pratiques.pdf>

3.3.3 Programmer et réaliser la maintenance préventive



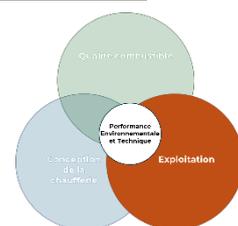
Constat :

La maintenance préventive des chaufferies bois est une opération spécialisée nécessitant une connaissance approfondie de la chaudière et de ses auxiliaires. Les agents de maintenance ou les sociétés de maintenance généralistes peuvent s'appuyer sur le plan de maintenance fourni par le constructeur mais cela nécessite de consacrer le temps nécessaire à l'entretien de la chaudière, ce qui n'est pas toujours fait. Pourtant, réaliser une maintenance préventive adaptée à son installation est le meilleur moyen de limiter le risque de panne ou de dysfonctionnement.

En particulier, la programmation des ramonages chaudières, foyer et échangeur, est une opération de maintenance préventive qui permet de garantir la pérennité du fonctionnement avec un rendement de combustion optimisé.

Même si la quasi-totalité des modèles de chaudières bois sont maintenant équipés de système de ramonage automatique qui permettent de limiter les ramonages manuels, il est nécessaire, dans la plupart des cas, de réaliser 1 ou 2 ramonages manuels par an afin de bien nettoyer le corps de chauffe et permettre au système de ramonage automatique de conserver son efficacité.

Le suivi régulier de la température des fumées, lisible directement sur l'automate chaudière, peut permettre de contrôler le degré d'encrassement de l'échangeur de chaleur et de déclencher éventuellement une opération de ramonage manuel. En effet, plus la chaudière est encrassée, plus les températures de fumées sont élevées. Le ramonage de la chaudière permettra de retrouver des températures de fumées conformes, qui seront le signe d'un meilleur rendement de combustion.



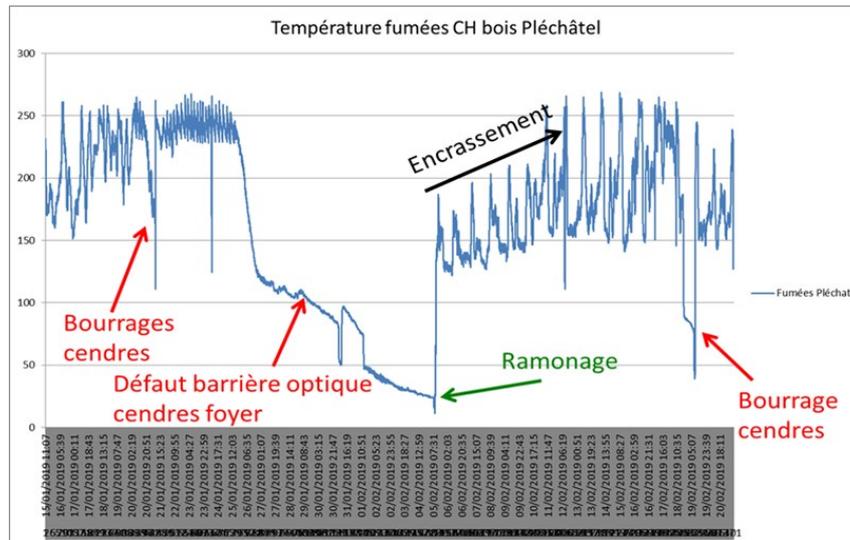


Figure 9 : Augmentation rapide des températures de fumées suite à un ramonage chaudière (cas d'une chaudière non équipée d'un système de ramonage automatique des tubes de fumées)

Recommandations :



Pour les chaudières ayant plusieurs années de service, il est recommandé de faire intervenir le constructeur ou son représentant au moment de l'intersaison, afin de réaliser un diagnostic de la chaudière et d'établir la liste des travaux de gros entretien à réaliser et commander les pièces détachées associées.

Pendant les premières années de fonctionnement, il est en revanche recommandé de faire intervenir le constructeur pendant la saison de chauffe, lorsque la chaudière est en fonctionnement, afin de vérifier que les réglages chaudière réalisés lors de la mise en service sont réellement adaptés.



Exemples :

- 1. Dans le cas où l'exploitation de la chaufferie est confiée à une société de maintenance, exiger que le contrat de maintenance comprenne l'intervention annuelle du constructeur en sous-traitance.
- 2. Dans le cas où l'exploitation de la chaufferie est réalisée en régie, établir un contrat de maintenance annuelle avec le constructeur ou son représentant, sur la base d'une ou deux visites par an en fonction de la taille de la chaufferie et des enjeux associés.



Quand appliquer ces recommandations ?

Le diagnostic d'intersaison doit être réalisé au plus tôt après la fin de la saison de chauffe, afin d'avoir le temps de réaliser les travaux de gros entretien pendant l'été et que la chaudière soit prête à redémarrer dans des conditions optimales pour le début de la saison de chauffe suivante.



Quels outils existent ?

- **CIBE. (2014).** *Causes et remèdes aux dégradations de performances d'une chaudière biomasse.* <https://cibe.fr/documents/causes-remedes-aux-degradations-de-performances-dune-chaudiere-biomasse-2014-rex-4/>
- **CRER. (2020).** *Liste de points de contrôle pour l'entretien. Comité Régional de l'Énergie Renouvelable.* <https://cibe.fr/wp-content/uploads/2020/10/2020-CRER-Points-de-contr%C3%B4le-Maintenance.pdf>
- **CIBE. (2022).** *Pannes et maintenance dans les chaufferies bois (2022-REX-2). Comité Interprofessionnel du Bois-énergie.* <https://cibe.fr/documents/pannes-maintenance-chaufferies-bois/>

3.3.4 Le suivi d'exploitation et le bilan annuel : boussole vers la performance de l'installation



Constat :

Beaucoup de petites et moyennes installations ne bénéficient pas d'un suivi des performances adapté. Soit l'exploitant ne réalise aucun suivi, soit il réalise un suivi mais n'exploite pas correctement les données qu'il recueille car il ne calcule pas les indicateurs de performance de base qui permettent de vérifier le bon fonctionnement.

Pourtant, les émissions atmosphériques d'une chaufferie bois sont directement corrélées à son fonctionnement, il est donc primordial de suivre et contrôler les performances de son installation.



Recommandation :

Même s'il n'est pas évident de quantifier l'énergie entrante sous forme de bois, du fait notamment de la marge d'erreur qu'il peut y avoir sur la détermination du PCI (incertitude liée à la représentativité de l'échantillonnage, à la mesure du taux d'humidité et à l'essence du bois), il est tout-de-même recommandé de calculer et de suivre le rendement moyen annuel de l'installation.

Le rendement moyen résulte directement du respect du triptyque fondamental : un bon dimensionnement, une conduite et une maintenance adaptée et l'utilisation d'un combustible en adéquation avec les caractéristiques de l'installation et les réglages chaudière.

Par conséquent, un rendement moyen annuel élevé (> 80%) ne peut être atteint que si les 3 facteurs du triptyque sont respectés et garantit qu'il n'y a pas de dérive dans les émissions atmosphériques de la chaufferie. Pour cela nous pouvons proposer plusieurs conseils dont voici quelques exemples :



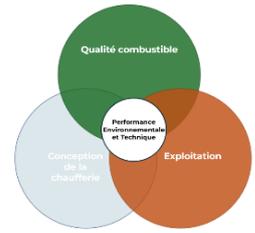
Exemples :

- 1. Passer régulièrement en chaufferie afin de contrôler les indicateurs de conduite journalière : température de fumées, taux d'oxygène dans les fumées, aspect et couleur des cendres, température de départ/retour...
- 2. Réaliser un suivi de l'exploitation avec suivi des livraisons de combustible et relevé mensuel des compteurs.
- 3. A l'aide des relevés réalisés, calculer les indicateurs de base qui permettent de vérifier le bon fonctionnement de l'installation : rendement moyen chaudière, taux de couverture bois, rendement réseau, heures équivalentes pleine puissance...



Quand appliquer ces recommandations ?

La périodicité des relevés et la mise à jour du tableau de suivi sont à adapter en fonction de la taille de la chaufferie. Les petites et moyennes chaufferies (< 1 MW) sont en général sur un



rythme de relevé mensuel, mais les chaufferies intermédiaires entre 500 et 1000 kW peuvent réaliser des relevés bimensuels, voire hebdomadaires.

Plus la fréquence des relevés est élevée, plus le suivi de l'installation est fin et plus vite on peut repérer une dérive des performances. Attention toutefois à ne pas « dégouter » l'opérateur en chaufferie avec des relevés trop fréquents. Un équilibre est à trouver, il est propre à chaque installation en fonction de la disponibilité de l'exploitant et des enjeux techniques et financiers liés au fonctionnement de la chaudière bois.



Quels outils existent ?

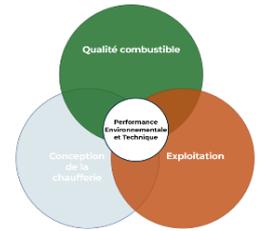
Les sociétés d'exploitation spécialisées, qui proposent des prestations de type P1, ont développé leur propre système de suivi des performances afin de suivre techniquement et financièrement le compte P1. Le maître d'ouvrage ayant signé un contrat d'exploitation incluant le P1 doit donc exiger dans le rapport annuel d'exploitation une partie consacrée au suivi du P1, incluant le calcul des principaux indicateurs de performance.

Les maîtres d'ouvrage qui exploitent leur installation en régie, ou qui n'ont pas confié la gestion du P1 à leur exploitant professionnel, sont souvent en difficulté pour suivre leurs installations car ils ne disposent pas des outils adaptés ou ne savent pas les faire vivre dans la durée.

De nombreuses structures d'animation bois-énergie ont développé des outils de suivi qu'elles peuvent mettre à disposition des maîtres d'ouvrage désireux de suivre les performances de leur installation. Une formation du gestionnaire de la chaufferie par la structure d'animation est nécessaire à la bonne prise en main de l'outil de suivi, afin d'assurer l'autonomie du maître d'ouvrage et la pérennité du suivi.

- **AGEDEN. (s.d.). *Performance réelle des bâtiments publics : suivi des consommations.*** <https://www.ageden38.org/performance-reelle-batiments-publics/suivi-consommations/>

3.3.5 Assurer les conditions de performance des équipements de filtration



Constat :

Les fumées de combustion du bois contiennent des gaz (CO₂, CO, vapeur d'eau) et des particules (suies, COV, HAP) qui nécessitent un traitement pour respecter les normes environnementales. Certaines conditions empêchent le fonctionnement des filtres en place. Par exemple, dans le cadre de filtre à manches, en phase d'extinction-démarrage, la température de fumées est trop basse (risque de condensation) ce qui empêche l'utilisation optimal des filtres. Ils sont alors by-passés et ne jouent plus leur rôle.



Recommandations :

Il est essentiel d'ajuster les paramètres de combustion à l'humidité du combustible. Elle peut être contrôlée avec une étuve ou un four micro-onde. On peut également mettre en place des détecteurs d'humidité pour ajuster les paramètres de combustion pour améliorer les performances énergétiques et environnementales.

De plus, un surdimensionnement de la chaudière doit être absolument évité afin de limiter les courts-cycles et les phases d'arrêt et redémarrage : le filtre à manches est by-passé en cas de sous-charge, ce qui dégrade les performances environnementales, il est donc important de limiter les cycles d'extinction-démarrage.



Conseils :

Pour réaliser une bonne exploitation, il faut caractériser le combustible utilisé pour adapter les équipements de filtration et de réduction des Nox et effectuer un nettoyage et un contrôle régulier des systèmes de filtration : mensuel pour le dépoussiéreur, trimestriel pour l'extracteur de fumée.

L'électrofiltre est un outil de filtration sensible à l'encrassement, il doit donc être entretenu avec une grande rigueur pour éviter les arrêts intempestifs et garantir une filtration continue.

Enfin, quand le dimensionnement le permet, il faut limiter la longueur du conduit de raccordement entre chaudière et filtre et isoler thermiquement le conduit de raccordement.



Quand appliquer ces recommandations ?

- A chaque livraison : Vérifier et ajuster au besoin les paramètres de combustion pour assurer des fumées de qualité.
- De manière mensuelle et trimestrielle ou selon la planification d'entretien : Nettoyer le dépoussiéreur chaque mois pour maintenir l'efficacité de filtration. Effectuer des autocontrôles trimestriels des émissions et vérifier annuellement l'isolation et l'intégrité des conduits et suivre l'état des filtres (encrassement, dégradation, etc...).



Quels outils existent ?

- Sources : Directive européenne MCP (2015/2193/UE) / Arrêtés du 25 juillet et 30 juin 2009 /
- **ADEME & CIBE. (2024, 18 mars).** Enjeux de la pollution de l'air et impact des petites chaufferies biomasse [Webinaire]. https://cibe.fr/wp-content/uploads/2024/03/2024-03-19-Enjeux-QA-et-impact-petites-chaufferies-biomasse_ADEME-CIBE-Diff-V2.pdf

4 Conclusion

L'amélioration des performances environnementales des chaufferies biomasse de petite puissance repose sur une approche intégrée, couvrant l'ensemble du cycle de vie de l'installation. Les recommandations présentées dans cette note, fondées sur l'expérience des acteurs de la filière bois-énergie, ainsi que sur les dysfonctionnements relevés par le rapport ACIBIOQA (ADEME, 2023), visent à lever les principaux freins identifiés : surdimensionnement, manque de rigueur en phase de réception, et exploitation insuffisamment maîtrisée.

Les pistes qui pourraient permettre d'aller plus loin sont les suivantes :

- Intégrer ces recommandations dès la phase de programmation des projets, en associant l'ensemble des parties prenantes (maîtres d'ouvrage, bureaux d'études, exploitants, fournisseurs de combustible).
- S'appuyer sur les outils et guides existants (ADEME, réseaux de chaleur, etc.) pour faciliter la mise en œuvre.
- Sensibiliser et former les opérateurs à l'importance du suivi et de la maintenance, garants de la performance environnementale sur le long terme.

En agissant de manière proactive et coordonnée, il est possible de concilier performance environnementale, efficacité énergétique et viabilité économique des chaufferies biomasse, contribuant ainsi pleinement à la transition écologique.

5 Glossaire

ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) : Établissement public français chargé d'accompagner, de conseiller, de financer et de promouvoir la transition énergétique et écologique.

AILE (Association d'Initiatives Locales pour l'Énergie et l'Environnement) : Agence locale de l'énergie bretonne, créée en 1995, spécialisée dans la maîtrise de l'énergie et le développement des énergies renouvelables en milieu agricole et rural.

Ballon tampon (ou hydro-accumulateur) : Réservoir thermodynamique permettant de stocker l'énergie thermique produite par une chaudière biomasse en excès, afin de restituer cette énergie en période de charge faible ou nulle. Favorise la stabilité de fonctionnement de la chaudière et réduit les cycles marche/arrêt.

BImSchV (Bundes-Immissionsschutzverordnung, 1^{re} version) : Réglementation allemande sur la limitation des émissions atmosphériques pour les installations de combustion, imposant notamment un ratio minimal de 55 L/kW de puissance nominale pour les ballons tampons en chaufferie biomasse.

CCRB (Contrat de Chaleur Renouvelable Bretagne) : Dispositif contractuel passé entre les collectivités et l'ADEME, visant à subventionner la production de chaleur renouvelable (bois-énergie, géothermie, réseaux de chaleur) en Bretagne de 2025 à 2027.

CCRT (Contrat de Chaleur Renouvelable Territorial) : Dispositif de financement mis en place depuis 2015 par l'ADEME qui amène à un accord contractuel local entre une collectivité territoriale et le porteur de projet (chauffagiste, exploitant, fournisseur de réseau) définissant les conditions techniques, financières et de fonctionnement d'un réseau de chaleur à énergie renouvelable. Le CCRT encadre le suivi des performances énergétiques, la qualité des équipements, les modalités de subventionnement et les engagements de fourniture d'énergie renouvelable sur le territoire concerné.

CEE (Certificats d'Économies d'Énergie) : Mécanisme français d'incitation financière obligeant les fournisseurs d'énergie à promouvoir les économies d'énergie auprès des particuliers, professionnels et collectivités, avec des bonifications prévues pour le remplacement de chaudières fioul par chaudière bois jusqu'au 31 décembre 2026.

CEP (Conseiller en Énergie Partagée) : Professionnel indépendant accompagné par l'ADEME, chargé d'accompagner les collectivités et porteurs de projets dans la mise en place de solutions de maîtrise de l'énergie et d'énergies renouvelables.

CUMA (Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole) : Structure coopérative permettant à des agriculteurs de mutualiser l'achat et l'usage de matériels agricoles. Au Grand Ouest, la CUMA Ouest cohabite dans les mêmes locaux qu'AILE et collabore étroitement sur les questions de valorisation de la biomasse.

DJU (Degrés-jours unifiés) : Indicateur climatique agrégé mesurant la demande de chauffage d'un bâtiment en fonction des températures extérieures. Calculé sur une période (généralement annuelle), il sert à dimensionner les puissances de chauffage.

EnR'CHOIX : Méthodologie de l'ADEME pour guider les maîtres d'ouvrage publics dans l'intégration cohérente d'énergies renouvelables et de récupération (sobriété, efficacité, mutualisation, hiérarchisation des gisements).

EN 303-5 :2012 : Norme européenne définissant les exigences, méthodes d'essai et critères de performance des chaudières à bois d'une puissance nominale comprise entre 4 et 500 kW. Permet notamment de dimensionner le volume des ballons tampons selon la puissance installée et les conditions d'usage.

Enquête PEBB (Plan Bois-énergie Bretagne) : Questionnaires techniques et comportementaux adressés aux exploitants de chaufferies biomasse bretonnes, visant à mesurer les performances (rendement, HEPP, disponibilité) et les pratiques (maintenance, qualité du combustible, approvisionnement).

Fiches REX (Retour d'Expérience) : Documents de synthèse décrivant les bonnes pratiques, points de vigilance et enseignements tirés de visites de chaufferies bois (exemples : réseau de chaleur de Bannalec, ferme de Saint-Igeaux).

HEPP (Heures Équivalent Pleine Puissance) : Indicateur du fonctionnement d'une chaudière, correspondant au nombre d'heures théoriques où celle-ci fonctionnerait à sa puissance nominale pour fournir la même énergie annuelle. Critère crucial pour dimensionner économiquement un projet bois.

VAN (Valeur Actuelle Nette) : Somme des flux financiers actualisés (entrées et sorties) d'un projet à un taux donné (ici 2 %), utilisée pour mesurer la rentabilité à long terme.

6 Bibliographie

ADEME. (s.d). Cahier des charges de maintenance des chaufferies bois à alimentation automatique. <https://cibe.fr/wp-content/uploads/2017/02/Cahier-des-charges-de-maintenance.pdf>

ADEME. (2023, 30 juin). Émissions atmosphériques des chaufferies bois de puissance inférieure à 1 MW. <https://librairie.ademe.fr/air/6367-emissions-atmospheriques-des-chaufferies-bois-de-puissance-inferieure-a-1-mw.html>

ADEME & CIBE. (2024, 18 mars). Enjeux de la pollution de l'air et impact des petites chaufferies biomasse [Webinaire]. https://cibe.fr/wp-content/uploads/2024/03/2024-03-19-Enjeux-QA-et-impact-petites-chaufferies-biomasse_ADEME-CIBE-Diff-V2.pdf

ADEME. (2014). Évaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse. <https://librairie.ademe.fr/energies/2145-evaluation-des-performances-energetiques-et-environnementales-de-chaufferies-biomasse.html>

ADEME (Direction régionale Poitou-Charentes). (2013). Guide de bonnes pratiques des chaufferies bois à alimentation automatique (granulés et bois déchiqueté). <https://cibe.fr/wp-content/uploads/2017/02/Guide-de-bonnes-pratiques.pdf>

ADEME (Direction régionale Poitou-Charentes). (2020, novembre). Guide de réception des chaufferies bois à alimentation automatique (bois déchiqueté) <https://aile.asso.fr/wp-content/uploads/2020/11/Guide-de-reception-bois-dechiquete.pdf>

AILE. (2020). Optimiser le fonctionnement des chaufferies bois (OPTIWOOD). <https://aile.asso.fr/wp-content/uploads/2024/11/Optimiser-les-chaufferies-bois-OPTIWOOD.pdf>

AirParif. (2025). Étude - Mesures à l'émission de petites chaufferies biomasse (< 500 kW) en conditions réelles d'exploitation. https://www.airparif.fr/sites/default/files/2025-03/Rapport_Etude_Biomasse.pdf

AGEDEN. (s.d.). Performance réelle des bâtiments publics : usage. <https://www.ageden38.org/performance-reelle-batiments-publics/usage/>

AGEDEN. (s.d.). Performance réelle des bâtiments publics : réception et mise en service. <https://www.ageden38.org/performance-reelle-batiments-publics/reception-mise-service/>

AGEDEN. (s.d.). Performance réelle des bâtiments publics : suivi des consommations. <https://www.ageden38.org/performance-reelle-batiments-publics/suivi-consommations/>

Association Savoyarde pour le Développement des Énergies Renouvelables (ASDER). (2019). Guide méthodologique : Suivre sa chaufferie bois. <https://cibe.fr/documents/suivre-chaufferie-guide-methodologique-chaufferies-petite-moyenne-puissance/>

Atlansun. (2021). Solaire thermique : Livret technique pour la mise en service statique et dynamique. <https://atlansun.fr/ressources/solaire-thermique-livret-technique-pour-la-mise-en-service-statique-et-dynamique/>

CIBE. (2013). Modes de gestion. <https://cibe.fr/modes-de-gestion/>

CIBE. (2014). Causes et remèdes aux dégradations de performances d'une chaudière biomasse. <https://cibe.fr/documents/causes-remedes-aux-degradations-de-performances-dune-chaudiere-biomasse-2014-rex-4/>

CIBE. (2016, 16 mars). Émissions atmosphériques : évolution de la réglementation et solutions pour les moyennes puissances (Pinst < 2 MW). Salon Bois-énergie – Nancy.

[2025-ANI-2 – Recommandations pour améliorer les performances environnementales des installations biomasse – Commission ANI – Novembre 2025]

https://cibe.fr/wp-content/uploads/2023/09/emissions-atmospheriques-petites-chaufferies-bois-Synth_se.pdf

CIBE. (2015). Guide technique pour concevoir et dimensionner en toute sécurité un silo de chaufferie bois. <https://cibe.fr/documents/guide-technique-concevoir-dimensionner-toute-securite-silo-de-chaufferie-bois/>

CIBE. (2022). Pannes et maintenance dans les chaufferies bois (2022-REX-2). Comité Interprofessionnel du Bois-énergie. <https://cibe.fr/documents/pannes-maintenance-chaufferies-bois/>

Cegibat. (2022). Analyse fonctionnelle installation chauffage ECS obligatoire. <https://cegibat.grdf.fr/reponse-expert/analyse-fonctionnelle-installation-chauffage-ecs-obligatoire>

CRER. (2020). Liste de points de contrôle pour l'entretien. Comité Régional de l'Énergie Renouvelable. <https://cibe.fr/wp-content/uploads/2020/10/2020-CRER-Points-de-contr%C3%B4le-Maintenance.pdf>

Directive européenne 2015/2193/UE. (2015). Directive MCP

Arrêtés du 25 juillet et 30 juin 2009.

EnR'Sim. (s.d.). Plateforme pédagogique sur les énergies renouvelables. <https://enrsim.ines-solaire.org/>

Énergie Plus. (s.d.). Chauffage au bois et qualité de l'air. <https://energieplus-lesite.be/>

FIBOIS & CARSAT. (2015). Guide technique concevoir et dimensionner en toute sécurité un silo de chaufferie bois. <https://cibe.fr/documents/guide-technique-concevoir-dimensionner-toute-securite-silo-de-chaufferie-bois/>

Laboratoire CERIC. (2024). Chauffage au bois et qualité de l'air. <https://www.laboratoire-ceric.com/chauffage-au-bois-et-qualite-de-lair/>

Le Monde. (2025, 27 mars). Alerte sur les petites chaufferies au bois et leurs impacts sur la pollution de l'air. https://www.lemonde.fr/planete/article/2025/03/27/alerte-sur-les-petites-chaufferies-au-bois-et-leurs-impacts-sur-la-pollution-de-l-air_6586704_3244.html

L'Édifice. (2025). Script de calcul du volume du ballon tampon pour l'hydro-accumulation. <https://ledifice.com/script-de-calcul-du-volume-d-un-ballon-tampon-pour-l-hydro-accumulation>

Metrol. (s.d.). Formation Adobois : formation des relais régionaux à la maintenance des chaufferies bois. <http://www.metrol.fr/adobois/>

OPTIWOOD. (2020). Guide OPTIWOOD. <https://optiwood.org/fr/>

Parc naturel régional du Morvan. (2015). Bois-énergie : Gestion d'une chaufferie plaquettes. https://www.parcumorvan.org/wp-content/uploads/2019/07/4pages_bois_energie_morvan_reduit.pdf

Programme PROFEEL. (2023). Guide : Impact des choix de conception sur la performance énergétique des générateurs de chauffage en habitat collectif. <https://www.proreno.fr/documents/impact-des-choix-de-conception-sur-la-performance-energetique-des-generateurs-de-chauffage-en-habitat-collectif>

Programme PROFEEL. (2019). Schémathèque : Appareils de chauffage aux granulés en habitat individuel. <https://www.proreno.fr/documents/schematheque-appareils-de-chauffage-aux-granules-en-habitat-individuel>

Programme PROFEEL. (2021). *Guide : Changement du générateur de chauffage – Impacts du dimensionnement (Habitat individuel).* <https://www.proreno.fr/documents/changement-du-generateur-de-chauffage-impacts-du-dimensionnement-habitat-individuel>

Programme RAGE. (2015, 17 décembre). *Guide : Les chaufferies au bois.* <https://www.proreno.fr/documents/les-chaufferies-au-bois>

Programme RAGE. (2013, 1er février). *Guide : Conception et dimensionnement des volumes tampons.* <https://www.proreno.fr/documents/conception-et-dimensionnement-des-volumes-tampons>

Programme RAGE. (2015). *Guide : Circuits hydrauliques – Composants et règles de conception.* <https://www.proreno.fr/documents/circuits-hydrauliques-composants-et-regles-de-conception>

Programme RAGE. (2014). *Guide : Installations d'eau chaude sanitaire – Confort, prévention des risques et maîtrise des consommations.* <https://www.proreno.fr/documents/installations-deau-chaude-sanitaire-confort-prevention-des-risques-et-maitrise-des-consommations>

Programme RAGE. (2014). *Guide : Gestion technique du bâtiment – Bonnes pratiques.* <https://www.proreno.fr/documents/gestion-technique-du-batiment-bonnes-pratiques>

SOCOL. (2021). *Guide technique pour la mise en service des installations solaires thermiques.* <https://atlansun.fr/ressources/solaire-thermique-livret-technique-pour-la-mise-en-service-statique-et-dynamique/>

Annexe I : Méthode de conception d'un stockage thermique

D'après le rapport du Laboratoire PROMES-CNRS, Cylergie et l'Université de Perpignan, *dimensionnement et gestion d'un système de stockage thermique par hydroaccumulation : application à la chaufferie multi-énergie de Maromme* :

« Il est possible d'obtenir, par un choix judicieux du volume du système de stockage, une économie financière significative sur la durée d'exploitation du site de Maromme. Une réduction importante du nombre de démarrages et d'arrêts des chaudières bois, permettant de diminuer les coûts de maintenance de ces générateurs, est par ailleurs observée. »

En outre, une directive allemande « *BImSchV (first Federal EmissionControl Act)* » exige un minimum de 55L/kW de puissance chaudière (nominale). Concrètement, cela équivaut à une différence de température de 15,64 K si l'on considère une durée moyenne de chauffe d'environ 3,5 heures. Quant à la norme EN 303.5, elle précise le calcul :

$$V_{sp} = 15 * T_b * Q_N * \left(1 - 0,3 * \frac{Q_H}{Q_{mini}} \right)$$

Équation 1 : Calcul du volume d'hydro-accumulation d'une installation biomasse selon la norme EN 303.5

Avec :

V_{sp} : Volume du ballon d'accumulation en litres

T_b : Autonomie de la chaudière à la puissance nominale en heures

Q_N : Puissance nominale en kW de la chaudière

Q_H : Besoins thermiques en kW

Q_{mini} : Puissance utile minimale en kW de la chaudière (régime réduit)

Le sujet étant encadré par des normes et des recommandations, il est pertinent sur tous les plans d'installer ce type d'équipement (dans le cas où une place en chaufferie est disponible ou si le changement de générateur de chaleur implique la réalisation de travaux de gros œuvre). Cependant, on remarque le plus souvent que le volume du ballon d'hydro-accumulation n'est pas suffisant pour obtenir un taux de couverture de 100% sans surdimensionnement de l'installation. Celui-ci est plutôt dimensionné pour absorber l'énergie résiduelle du foyer en cas d'absence de demande sur le réseau. En première approche, on considère pertinent un volume avoisinant les 15 à 20L/kW installé. Cependant, cette donnée n'est qu'une première approche qui mérite d'être approfondie.

Pour bien dimensionner une installation, il est important de suivre cette démarche :

- Définir les besoins et la destination de la chaleur produite (dans la situation de référence, consommation à l'année)
- Définir le/les profil(s) de consommation de/des bâtiments (chauffage, reprise, cuisines, lavage des mains, etc.) et les plages horaires associées

Pour illustrer nos propos, nous avons représenté les évolutions du profil de consommation tout au long de la journée pour une école, température de référence de -4°C (zone B entre 0 et 200m d'altitude) :

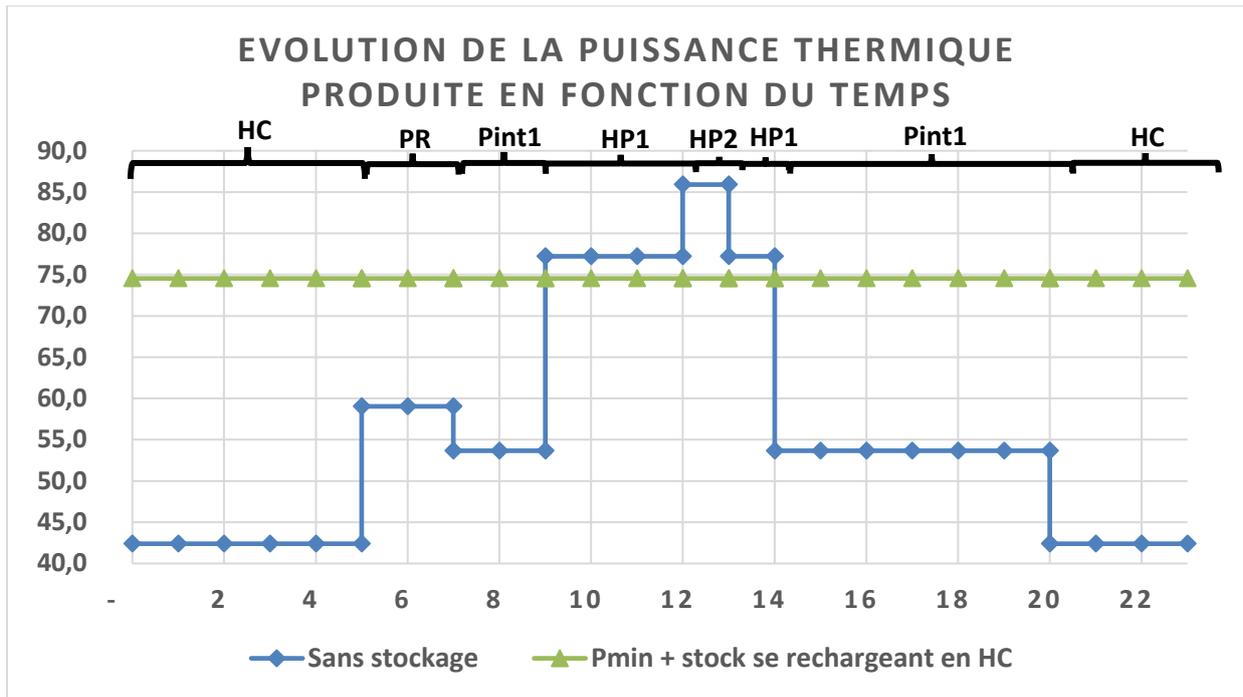


Figure 10 : Exemple de profil de consommation d'un bâtiment d'enseignement

Avec :

HC : Heures creuses, maintien du chauffage à 16°C

Pint 1 : Puissance intermédiaire 1, chauffage à 19°C en période d'occupation

PR : Puissance de relevage, défini par un coefficient de surpuissance de 10% par rapport à la puissance de chauffe en période d'occupation, soit 1,1 Pint1.

HP1 : Heures pleines 1, chauffage à 19°C + puissance d'appel pour la préparation de repas

HP2 : Heures pleines 2, chauffage à 19°C + puissance d'appel pour la préparation de repas + lavage des mains avant le repas.

- Définir la puissance à installer et le volume de son ballon d'hydro-accumulation : à partir de ce profil de consommation au moment le plus « critique » de l'année, on peut définir la puissance à installer associée à un ballon d'hydro-accumulation adéquat. Il existe plusieurs méthodes pour calculer cette puissance, nous vous proposons un modèle qui considère une puissance minimale fonctionnant en continu et que l'on ajoute une puissance qui recharge le stockage durant les périodes d'heures creuses (Pint1, PR, HP1 et HP2 dans ce cas).

Le calcul réalisé est modulable en fonction de la puissance considérée comme « minimale » choisie que l'on nommera P_{min} :

$$E_{stock} = \sum (P_i - P_{min}) * t_i, \text{ avec } P_i > P_{min}$$

Équation 2 : Calcul de l'énergie à stocker dans le ballon d'hydro-accumulation

Dans notre cas, on a choisi $P_{min} = 69 \text{ kW}$, on a alors :

$$E_{stock} = (P_{HP1} - P_{min}) * t_{HP1} + (P_{HP2} - P_{min}) * t_{HP2}$$

$$E_{stock} = (77,2 - 53,7) * 4 + (85,9 - 53,7) * 1 = 50 \text{ kWh}$$

Ensuite, on calcule la puissance supplémentaire que cela représente qui sera à ajouter à la puissance minimale en prenant comme hypothèse que le ballon ne sera rechargé qu'en « heures creuses » :

$$P_{supp} = \frac{E_{stock}}{t_{HC}} = \frac{50}{9} = 5,5 \text{ kW}$$

Équation 3 : Calcul de la puissance supplémentaire à installer

$$P_{inst} = P_{min} + P_{supp} = 69 + 5,5 = 74,5 \text{ kW}$$

On en déduit la puissance que le ballon devra délivrer :

$$P_{ballon} = P_{max} - P_{inst} = 85,9 - 74,5 = 11,4 \text{ kW}$$

Et on calcule le volume du ballon d'hydro-accumulation nécessaire pour le stockage de l'énergie à stocker pour un régime de température avec un delta entre le départ et le retour de 20°C :

$$V_{ballon} = \frac{E_{stock} * 3600}{\rho_{eau,70^\circ C} * c_{p_{eau}} * \Delta T} * 1000 = \frac{50 * 3600}{977 * 4,181 * 20} * 1000 = 2 \text{ 195L}$$

Équation 4 : Calcul du volume du ballon d'hydro-accumulation selon l'outil de dimensionnement créé

Le dimensionnement a été réalisé avec une température de référence de -4°C. Si l'on étudie la fréquence des températures sur l'année en se basant sur les 10 dernières années, on constate que la température minimale obtenue est de -1°C, l'installation dimensionnée pourra alors répondre sans difficulté à ces besoins si l'exploitation est bien réalisée. Par mesure de sécurité, on prévoit un surdimensionnement de 5%, soit une puissance installée de 78,3 kW.

On constate que la charge du ballon permet d'éviter des arrêts intempestifs de la chaudière. Avec ce système en chaufferie, la chaudière s'arrête seulement quand la puissance d'appel est inférieure au minimum technique et que le ballon est plein. Dans ce cas, cela permettra d'éviter 367 arrêts, soit 51,3% des arrêts s'il n'y avait pas de ballon d'hydro-accumulation.

De plus, la décharge du ballon d'hydro-accumulation rend possible la fourniture de chaleur en dessous du minimum technique, ce qui permet de limiter les coûts d'installation. En effet, dans le cas d'une chaufferie sans ballon, il aurait été nécessaire d'installer une autre chaudière, souvent fossile afin de prendre le relais pour ces appoints. Grâce au stockage thermique mis en place, nous pouvons fournir 35,5 MWh, soit 30,7% de la consommation annuelle du bâtiment.

Une étude de l'université des sciences appliquées de Lucerne montre qu'en doublant la capacité du ballon (passant de 30 à 60 min de la puissance chaudière), les émissions annuelles de monoxyde de carbone (CO) chutent d'environ 17 % et celles de particules fines d'environ 8 %.