

Verenum SA
Langmauerstrasse 109
CH – 8006 Zurich
www.verenum.ch

PRINCIPES DE BASE ET RECOMMANDATIONS POUR LE DIMENSIONNEMENT DES ACCUMULATEURS DE CHALEUR POUR DES CHAU- DIÈRES À BOIS

Jürgen Good
Peter Zotter

Cette étude a été rédigée sur mandat de l'OFEV. Le mandataire est seul responsable du contenu.

Zurich, le 11 avril 2022

(Version actualisée, état de l'ordonnance sur la protection de l'air le 1^{er} janvier 2022)

Principes de base et recommandations pour le dimensionnement des accumulateurs de chaleur pour des chaudières à bois

Mandant

Office fédéral de l'environnement OFEV
Division Protection de l'air et produits chimiques
CH – 3003 Berne
www.bafu.admin.ch/air

Auteurs

Jürgen Good, Verenum SA, 8006 Zurich
Peter Zotter, Verenum SA, 8006 Zurich

Verenum SA

Langmauerstrasse 109
CH – 8006 Zurich
www.verenum.ch

Sommaire

1	Situation initiale et objectifs	4
2	Procédure	4
3	Principes de base et recommandations	5
3.1	Dimensionnement de l'accumulateur pour les chaudières à bûches à chargement manuel	5
3.2	Capacité de stockage pour les chaudières à bois à chargement automatique jusqu'à 500 kW _{PCN}	5
3.3	Capacité de stockage pour les chaudières à bois de plus de 500 kW _{PCN}	6
3.4	Capacité de stockage pour les installations avec plusieurs chaudières à bois	7
3.5	Accumulateur pour capteurs solaires thermiques et eau chaude sanitaire	7
3.6	Marge de manœuvre de l'autorité pour la détermination de la capacité de stockage	8
A	Annexe – explications détaillées	9
A.1	Capacité de stockage selon l'OPair pour les chaudières à bûches à chargement manuel – évaluation par rapport à d'autres recommandations	9
A.2	Capacité de stockage selon OPair pour les chaudières à bois à chargement automatique – évaluation par rapport à d'autres recommandations	10
A.3	Capacité de stockage pour les installations avec plusieurs chaudières à bois	13
A.4	Gestion de projet avec QM Chauffages au bois®	13
	Littérature	15

1 Situation initiale et objectifs

L'ordonnance sur la protection de l'air (OPair, [1]) impose, dans l'annexe 3, ch. 523, des prescriptions concernant la capacité minimale des accumulateurs de chaleur destinés aux chaudières à bois à chargement manuel et à chargement automatique.

Pour des chaudières à bois à chargement manuel, l'accumulateur de chaleur a pour fonction d'absorber toute la chaleur produite au cours d'un processus de combustion. En effet, ces chaudières ne permettent une utilisation à charge partielle que de manière limitée et il peut ainsi arriver que la quantité de chaleur effectivement produite soit supérieure à celle requise sur le moment. Pour les chaudières à bois à chargement automatique, les accumulateurs de chaleur servent à laisser le temps à l'installation de combustion pour pouvoir réagir aux variations rapides des besoins en énergie tout en fournissant ou en absorbant de la chaleur afin de moduler lentement la puissance de combustion. Un accumulateur de chaleur suffisamment grand, une puissance nominale adéquate et un fonctionnement modulant de la chaudière permettent d'allonger la durée de fonctionnement des installations, réduisent le nombre de démarrages et d'arrêts et contribuent à optimiser le maintien du lit de braise. Ce mode de fonctionnement augmente le rendement tout en réduisant les émissions, l'usure et l'entretien de la chaudière et du filtre à particules.

Pour les chaudières à bois à chargement manuel, l'OPair décrit deux types de dimensionnement : l'un tenant compte de la PCN et l'autre du volume de la chambre de remplissage. Pour les chaudières à chargement automatique, elle ne prévoit qu'un dimensionnement en fonction de la PCN. Selon l'annexe 3, ch. 523 de l'OPair, l'autorité peut également fixer des capacités de stockage inférieures si, selon l'al. 3, let. a, plusieurs installations de combustion forment ensemble une unité d'exploitation qui couvre, dans une configuration alternante, les besoins variables en chaleur ou en vapeur, ainsi que selon l'al. 3, let. b, lorsque cela est indiqué pour d'autres raisons techniques ou d'exploitation. Outre de l'OPair, il existe aussi des recommandations pour dimensionner les accumulateurs de chaleur des chaudières à bois à chargement manuel ou automatique dans la norme QM Chauffages au bois® (QM bois) ainsi que dans différentes fiches techniques de la branche. L'application pratique de l'annexe 3, ch. 523 de l'OPair par les autorités d'exécution, soulève des questions quant au dimensionnement d'un accumulateur de chaleur :

1. lorsque, pour des chaudières à bûches, le calcul de la capacité de stockage à partir du volume de la chambre de remplissage et à partir de la PCN aboutit à des valeurs différentes,
2. lorsque, pour des chaudières à bûches ou des chaudières à bois à chargement automatique, les recommandations de dimensionnement de la norme QM bois ou des fiches techniques de la branche indiquent d'autres capacités de stockage que l'OPair,
3. lorsque, deux chaudières à bois ou plus sont prévues dans la même centrale de chauffe,
4. lorsqu'un accumulateur de chaleur est utilisé conjointement avec une chaudière à bois et des capteurs solaires,
5. lorsque des accumulateurs de chaleur individuels sont présents pour l'eau chaude sanitaire ou des capteurs solaires,
6. lorsque, dans le cas de travaux d'assainissement, la chaufferie existante n'offre pas suffisamment de place pour installer un accumulateur de chaleur dimensionné conformément à l'OPair,
7. ou se pose aussi la question de la marge de manœuvre dont dispose l'autorité pour déterminer une capacité de stockage plus petite.

C'est pourquoi le présent document vise à fournir des principes de base et des recommandations pour le dimensionnement des accumulateurs de chaleur pour des chaudières à bois et de répondre ainsi d'une manière compréhensible et descriptive aux questions ci-dessus.

2 Procédure

Afin de formuler une base de décision pour le dimensionnement des accumulateurs, un travail de recherche a été mené au sujet des prescriptions et propositions des fabricants de chaudières, des associations industrielles et des administrations. Nous avons, en outre, réuni les données techniques d'un certain nombre de chaudières à bûches de différents fabricants et calculé des tailles d'accumulateurs sur la base de ces données. Si possible, nous avons comparé ces différentes informations et suggestions concernant le volume des accumulateurs sous forme de graphiques et de tableaux. Sur la base des données ainsi recueillies et des informations recherchées, des recommandations pour les questions ci-dessus concernant le dimensionnement des accumulateurs ont été formulées.

3 Principes de base et recommandations

3.1 Dimensionnement de l'accumulateur pour les chaudières à bûches à chargement manuel

Annexe 3, ch. 523, al. 1, OPair

« Les chaudières à chargement manuel d'une puissance calorifique nominale maximale de 500 kW doivent être équipées d'un accumulateur de chaleur d'une capacité minimale de 12 litres par litre de chambre de remplissage. Le volume ne doit pas être inférieur à 55 litres par kilowatt de puissance calorifique nominale. »

Le calcul de la capacité de stockage en fonction de la PCN ou du volume de la chambre de remplissage aboutit, en partie, à des résultats différents (voir annexe A.1).

Recommandation

Pour les chaudières à chargement manuel d'une puissance calorifique nominale inférieure ou égale à 500 kW, on choisira la plus grande capacité de stockage obtenue selon les deux méthodes de calcul, comme le prévoit l'OPair.

Cette capacité pourra être répartie entre deux ou plusieurs accumulateurs de chaleur.

3.2 Capacité de stockage pour les chaudières à bois à chargement automatique jusqu'à 500 kW_{PCN}

Annexe 3, ch. 523, al. 2, OPair

« Les chaudières à chargement automatique d'une puissance calorifique nominale maximale de 500 kW doivent être équipées d'un accumulateur de chaleur d'une capacité minimale de 25 litres par kilowatt de puissance calorifique nominale. Sont exceptées les chaudières pour granulés de bois d'une puissance calorifique maximale de 70 kW. »

Comparaison avec QM Chauffages au bois®

- QM bois exige que la capacité de stockage pour une chaudière à bois puisse absorber la quantité de chaleur produite en une heure de fonctionnement à PCN. En plus de la PCN, QM bois prend également en considération la différence de température utile ΔT au niveau de l'accumulateur et calcule ainsi des facteurs dans une plage d'environ 20 à 40 litres par kW de PCN. Si la différence de température utile est élevée, la capacité de stockage calculée d'après QM bois peut alors être inférieure à celle requise par l'OPair. Si tel est le cas, la plus petite capacité de stockage est néanmoins suffisante pour faire fonctionner la chaudière à bois de manière efficace et en produisant peu d'émissions (voir annexe A.2).
- La capacité pourra être répartie entre deux ou plusieurs accumulateurs de chaleur.
- Ces prescriptions s'appliquent aux systèmes destinés à produire de la chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Dans le cas des installations fournissant exclusivement de la chaleur destinée aux processus industriels ou commerciaux et dans le cas explicite d'un chauffage au bois avec exploitation stable, l'accumulateur peut être dimensionné selon d'autres critères.

Comparaison avec la recommandation Cercl'Air n° 31p (Fiches d'exécution de surveillance des émissions - Chauffages au bois d'une puissance calorifique supérieure à 70kW_{PC} [2])

- En règle générale, le Cercl'Air prescrit une capacité de stockage de 25 litres par kW de puissance thermique nominale, conformément à l'OPair. Si, pour des raisons techniques ou d'exploitation, une capacité de stockage inférieure est indiquée, certaines conditions doivent être remplies, qui sont décrites plus en détail dans l'annexe A.2.

Comparaison avec d'autres prescriptions

- En Allemagne, la 1^{re} ordonnance fédérale sur la protection contre les polluants (1^{re} BImSchV) exige, pour les chaudières à bois à chargement automatique d'une puissance allant jusqu'à 1000 kW_{PCN}, une capacité de stockage d'au moins 20 litres/kW_{PCN}.

Recommandation

Si, pour des raisons d'exploitation ou techniques, une capacité de stockage inférieure à celle prescrite par l'OPair est prévue et qu'un suivi du projet par QM bois donne une capacité de stockage inférieure, c'est cette capacité inférieure qui est déterminante. Dans ce cas, il faut s'assurer que les principales exigences de QM bois sont respectées (voir annexe A.4). Une capacité de stockage inférieure à celle prescrite par l'OPair devrait dans tous les cas être discutée avec les autorités compétentes dès la phase de planification.

3.3 Capacité de stockage pour les chaudières à bois de plus de 500 kW_{PCN}

Annexe 3, ch. 523, al. 2^{bis}, OPair

«Pour les chaudières d'une puissance calorifique nominale supérieure à 500 kW, l'autorité fixe les capacités de stockage. Si ces chaudières servent à la production de chaleur ambiante ou d'eau chaude, elles doivent être équipées d'un accumulateur de chaleur d'une capacité minimale de 25 litres par kilowatt de puissance calorifique nominale.»

Comparaison avec QM Chauffages au bois®

- Pour les chaudières automatiques au bois d'une puissance supérieure à 500 kW_{PCN}, QM bois impose les mêmes exigences que pour les chaudières automatiques au bois d'une puissance inférieure à 500 kW_{PCN} (voir chapitre 3.2). Pour les installations de cette taille, un accompagnement de projet avec QM bois_Standard ou QM bois_Simplifié est recommandé.

Comparaison avec la recommandation Cercl'Air n° 31p

- Selon la recommandation de Cercl'Air, les chaudières automatiques au bois de plus de 500 kW_{PCN} devraient être équipées d'un accumulateur de chaleur d'une capacité d'au moins 25 litres par kW_{PCN}. Pour les installations de cette taille, il est également recommandé de suivre le projet avec QM bois_Standard ou QM bois_Simplifié. Si la capacité de stockage calculée selon le QM bois est inférieure aux 25 litres par kW_{PCN} prescrits par l'OPair, la capacité de stockage exigée par le QM bois doit être déterminante.

Comparaison avec d'autres prescriptions

- Pour les chaudières automatiques au bois entre 500 kW_{PCN} et 1 MW_{PCN}, la 1^{re} BImSchV prescrit une capacité de stockage d'au moins 20 litres par kW_{PCN}. Pour les chaudières automatiques au bois d'une puissance supérieure à 1 MW_{PCN}, il n'y a pas de prescriptions en Allemagne concernant les capacités de stockage de chaleur (voir 44^e BImSchV pour les installations de combustion moyennes, les turbines à gaz et les moteurs à combustion d'une puissance calorifique d'au moins 1 mégawatt et de moins de 50 mégawatts).

Recommandation

Si, pour des raisons d'exploitation ou techniques, une capacité de stockage inférieure à celle prescrite par l'OPair est prévue et qu'un suivi du projet par QM bois donne une capacité de stockage inférieure, c'est cette capacité inférieure qui est déterminante. Dans ce cas, il faut s'assurer que les principales exigences de QM bois sont respectées (voir annexe A.4). Une capacité de stockage inférieure à celle prescrite par l'OPair devrait dans tous les cas être discutée avec les autorités compétentes dès la phase de planification.

3.4 Capacité de stockage pour les installations avec plusieurs chaudières à bois

Annexe 3, ch. 523, al. 3, let. a, OPair

« L'autorité peut fixer des capacités de stockage inférieures à celles qui sont exigées aux al. 1, 2 et 2^{bis} si:

a. plusieurs installations de combustion sont utilisées ensemble en tant qu'unité d'exploitation de façon modulaire pour couvrir des besoins variables en chaleur ou en vapeur;
[...]. »

Comparaison avec la recommandation Cercl'Air n° 31p

- Selon la recommandation de Cercl'Air, la capacité minimale de stockage des installations à plusieurs chaudières doit être conçue pour atteindre au moins $\frac{2}{3}$ de la puissance calorifique nominale totale (somme de toutes les chaudières).

Description des concepts d'installation possibles

- Les installations avec deux ou plus de chaudières à bois ont pour avantage que, lorsque les besoins en énergie sont faibles (p. ex. en été et à l'entre-saison), seul le nombre de chaudières à bois adapté à la demande d'énergie réduite est en service, ce qui permet un fonctionnement efficace et pauvre en émissions. Dans les installations en cascade avec des chaudières à bois de puissance calorifique nominale identique ou similaire, les chaudières sont généralement exploitées en alternance, de sorte que le nombre d'heures de fonctionnement sur l'année est à peu près le même. Dans le cas d'une autre répartition de la puissance (par exemple $\frac{1}{3}$ et $\frac{2}{3}$), la plus petite chaudière à bois fonctionne en été et à l'entre-saison, tandis que la plus grande prend le relais par temps froid. Elles s'associent toutes les deux par temps très froid. Dans ce cas, le passage d'une chaudière à l'autre se fait en fonction des besoins en énergie, sans équilibrer les heures de fonctionnement annuelles.

Dimensionnement des accumulateurs selon QM bois

- QM bois recommande, pour les installations comprenant deux chaudières ou plus, que la capacité de stockage soit dimensionnée pour au moins aux $\frac{2}{3}$ de la PCN totale de toutes les chaudières à bois.

Recommandation

- La capacité de stockage des installations composées de deux ou plus chaudières à bois ayant une PCN identique ou différente doit être calculée comme suit (voir annexe A.3) :
 - La capacité de stockage doit être dimensionnée pour au moins une heure de fonctionnement aux $\frac{2}{3}$ de la PCN totale de toutes les chaudières à bois.
 - Capacité de stockage [l] = $\frac{2}{3} * \sum PCN [kW] * x [l/kW]$ (1)
- Le facteur x utilisé pour le calcul de la capacité de stockage doit être au moins égal à 25 l/kW_{PCN}.
- Si un projet est géré avec QM bois et que la capacité de stockage calculée avec QM bois est inférieure à celle requise par l'OPair, c'est la capacité selon QM bois qui sera déterminante. Dans ce cas, il faut s'assurer que les principales exigences de QM bois sont respectées (voir annexe A.4).
- Une capacité de stockage inférieure à celle prescrite par l'OPair devrait dans tous les cas être discutée avec les autorités compétentes dès la phase de planification.

3.5 Accumulateur pour capteurs solaires thermiques et eau chaude sanitaire

Capteurs solaires thermiques intégrés à un ballon d'eau chaude sanitaire individuel

Pour QM bois, le volume de l'accumulateur doit être entièrement mis à la disposition de la chaudière à bois et donc être dimensionné en conséquence. Pour les installations de grande taille, les capteurs solaires thermiques doivent ainsi être intégrés hydrauliquement à un ballon d'eau chaude individuel au dimensionnement adapté aux capteurs solaires et la surface de ces derniers doit être définie afin de couvrir, par ex., 50% des besoins annuels en eau chaude. En été, les besoins en eau chaude sanitaire peuvent ainsi être couverts par les capteurs solaires sans que la chaudière à bois ne doive être mise en service.

Capteurs solaires thermiques intégrés à l'accumulateur de chaleur de la chaudière à bois

Pendant la saison de chauffage, les capteurs solaires thermiques contribuent relativement peu à la production de chaleur. S'ils sont intégrés hydrauliquement à l'accumulateur de chaleur de la chaudière à bois, l'apport solaire perturbe la stratification thermique dans l'accumulateur et, par conséquent, le bon fonctionnement de la chaudière. QM bois recommande donc de calculer séparément la capacité de stockage requise pour la chaudière à bois et celle requise pour les capteurs solaires thermiques, puis de les additionner.

Recommandation (pour les installations de plus de 70 kW_{PCN})

Le volume de l'accumulateur de chaleur doit être entièrement mis à la disposition de la chaudière à bois. Les accumulateurs séparés et destinés aux capteurs solaires thermiques et/ou à l'eau chaude sanitaire ne peuvent pas être intégrés au volume de l'accumulateur pour la chaudière à bois.

Capteurs solaires thermiques

Si un accumulateur de chaleur commun est prévu pour la chaudière à bois et les capteurs solaires thermiques, la capacité de stockage de la chaudière à bois et celle des capteurs solaires thermiques doivent être calculées séparément, puis additionnées.

Accumulateur pour l'eau chaude sanitaire

Si un accumulateur de chaleur commun est prévu pour la chaudière à bois et l'eau chaude sanitaire, la capacité de stockage de la chaudière à bois et celle de l'eau chaude sanitaire doivent être calculées séparément, puis additionnées.

3.6 Marge de manœuvre de l'autorité pour la détermination de la capacité de stockage

Annexe 3, ch. 523, al. 3, let. b OPair

« L'autorité peut fixer des capacités de stockage inférieures à celles qui sont exigées aux al. 1, 2 et 2^{bis} si:

[...]

b. cela est indiqué pour des raisons relevant de l'exploitation ou de la technique. »

Comparaison avec la recommandation Cercl'Air n° 31p

- Selon la recommandation Cercl'Air n° 31p, il est également possible de fixer des tailles d'accumulateur plus petites si cela est indiqué pour des raisons techniques ou d'exploitation. Dans ce contexte, pour les chauffages au bois de plus de 70 kW_{PC}, des directives sont toutefois fixées concernant le nombre de démarrages par an (moins de 1 000 jusqu'à 100 kW_{PC} et moins de 500 démarrages par an pour les puissances supérieures) et par jour de chauffage (moins de 3 à 5 démarrages par jour de chauffage) et concernant le fonctionnement à faible charge. Celles-ci sont décrites plus en détail à l'annexe A.2. Pour les installations à plusieurs chaudières, la capacité minimale de stockage doit être dimensionnée à au moins $\frac{2}{3}$ de la puissance calorifique nominale totale (somme de toutes les chaudières). Pour les installations de plus de 500 kW_{PC}, la recommandation Cercl'Air recommande un accompagnement par QM bois. Si la capacité de stockage calculée selon QM bois est inférieure aux 25 litres recommandés par kW_{PCN}, la capacité de stockage exigée par QM bois doit être déterminante.

Recommandation

Dans les cas où la chaudière à bois doit être assainie et où l'installation ne comprenait aucun accumulateur ou un de trop petite taille, et où l'espace disponible dans la chaufferie est limité, l'autorité peut fixer une capacité de stockage de chaleur plus petite ou, dans le cas d'installations de chauffage existantes, renoncer à l'obligation de mise à niveau pour augmenter la capacité de stockage, si les points suivants sont pris en compte :

- L'espace disponible pour l'accumulateur doit être utilisé au maximum.
- La capacité de stockage peut être répartie sur deux ou plus d'accumulateurs.
- Les conditions pour le fonctionnement à faible charge de QM bois doivent être respectées (FAQ 12, QMmini).
- Selon la FAQ 8, il doit y avoir moins de 3 à 5 démarrages par jour de chauffage et par chaudière. Cela peut être garanti par un accompagnement par QM bois.
- Une capacité de stockage inférieure à celle prescrite par l'OPair devrait dans tous les cas être discutée avec les autorités compétentes dès la phase de planification.

A Annexe – explications détaillées

A.1 Capacité de stockage selon l'OPair pour les chaudières à bûches à chargement manuel – évaluation par rapport à d'autres recommandations

Annexe 3, ch. 523, al. 1, OPair

« Les chaudières à chargement manuel d'une puissance calorifique nominale maximale de 500 kW doivent être équipées d'un accumulateur de chaleur d'une capacité minimale de 12 litres par litre de chambre de remplissage. Le volume ne doit pas être inférieur à 55 litres par kilowatt de puissance calorifique nominale. »

EN 303-5:2021

Parallèlement à l'OPair, la norme EN 303-5 [3] comprend aussi une méthode de calcul pour le dimensionnement d'un accumulateur de chaleur destiné aux chaudières à bûches à chargement manuel jusqu'à 500 kW_{PCN}. Cette méthode est comparée aux spécifications de l'OPair dans l'illustration 1. Cette spécification est également utilisée par les associations Minergie, EnergieSuisse et Energie-bois Suisse en aide au dimensionnement des chauffages au bois [4]. Dans le contexte de la plus petite puissance calorifique pour une chaudière à bûches, la norme EN 303-5 exige comme valeur de référence pour le plus petit accumulateur de chaleur :

$$V_{Sp} = 15 \cdot T_B \cdot P_N \cdot \left(1 - 0,3 \cdot \frac{P_H}{P_{min}}\right) \quad (2)$$

Où

- V_{sp} est le volume de l'accumulateur de chaleur en litres ;
 T_B est la durée de combustion en heures ;
 P_N est la puissance calorifique nominale en kilowatt ;
 P_H est la charge de chauffe du bâtiment en kilowatt ;
 P_{min} est la plus petite puissance calorifique (de la chaudière à bûches) en kilowatt ;
les chiffres signifiant : 15 : 15 l/kWh, 1 : 100%, 0,3 : 30%

Pour les chaudières agréées pour plusieurs types de combustibles, c'est le combustible nécessitant le plus gros accumulateur de chaleur qui est déterminant pour le dimensionnement. Le volume minimal est de 300 l.

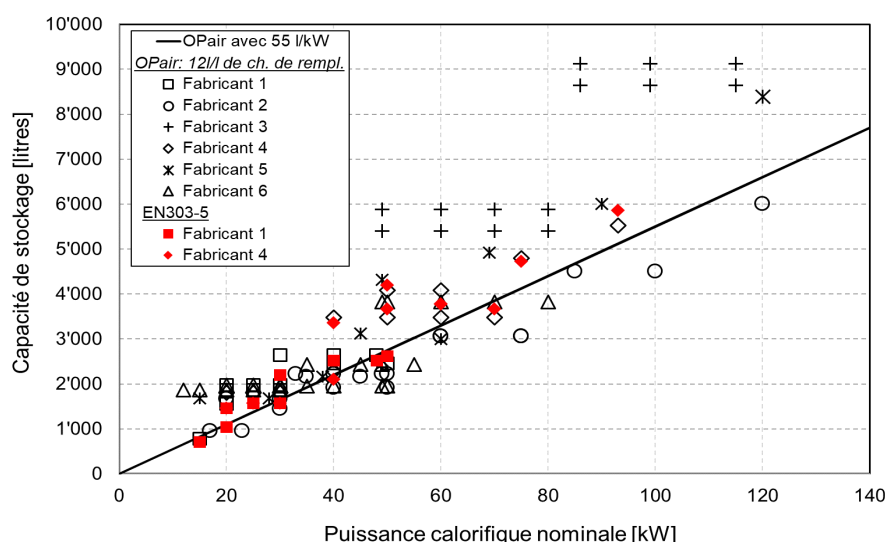


Illustration 1 : Capacité de stockage des chaudières à bûches à chargement manuel en fonction de la puissance calorifique nominale ; calcul basé sur différentes versions.

Ligne noire : capacité de stockage calculée selon l'OPair avec 55 l/kW.

Symboles noirs : capacité de stockage calculée selon l'OPair avec 12 l par litre de chambre de remplissage. Les différentes formes de symbole représentent les différents fabricants de chaudières.

Symboles rouges : capacité de stockage calculée selon EN 303-5 en se basant sur $P_H/P_{min} = 1$ (voir formule 3).

Comme le montre l'illustration 1, les deux versions de calcul de l'OPair aboutissent à des capacités de stockage variant d'un facteur pouvant dépasser 2, tandis qu'un dimensionnement selon EN 303-5 permet d'obtenir des volumes qui se situent dans la plage des calculs OPair.

A.2 Capacité de stockage selon OPair pour les chaudières à bois à chargement automatique – évaluation par rapport à d'autres recommandations

Annexe 3, ch. 523, al. 2 et 2^{bis}, OPair

«Les chaudières à chargement automatique d'une puissance calorifique nominale maximale de 500 kW doivent être équipées d'un accumulateur de chaleur d'une capacité minimale de 25 litres par kilowatt de puissance calorifique nominale. Sont exceptées les chaudières pour granulés de bois d'une puissance calorifique maximale de 70 kW.»

« Pour les chaudières d'une puissance calorifique nominale supérieure à 500 kW, l'autorité fixe les capacités de stockage. Si ces chaudières servent à la production de chaleur ambiante ou d'eau chaude, elles doivent être équipées d'un accumulateur de chaleur d'une capacité minimale de 25 litres par kilowatt de puissance calorifique nominale. »

Parallèlement à l'OPair, il existe d'autres directives et recommandations d'autorités et d'associations pour calculer la capacité de stockage ; elles sont énumérées ci-dessous et présentées dans l'illustration 2 et le tableau 1 :

- L'ordonnance allemande sur les petites et moyennes installations de chauffage (1^{re} BImSchV) prévoit une capacité de stockage d'au moins 20 litres par kW_{PCN} (art. 5, al. 4 de la 1^{re} BImSchV [5]). Pour les chaudières automatiques au bois d'une puissance supérieure à 1 MW_{PCN}, il n'existe aucune prescription concernant les volumes d'accumulation de chaleur (voir 44^e BImSchV pour les installations de combustion, les turbines à gaz et les moteurs à combustion de taille moyenne d'une puissance calorifique de combustion d'au moins 1 mégawatt et de moins de 50 mégawatts [6]).
- QM bois exige que la capacité de stockage pour une chaudière à bois puisse absorber la quantité de chaleur produite en une heure de fonctionnement à PCN. Pour cela, QM bois prend en compte la différence de température utile (ΔT) au niveau de l'accumulateur, qui résulte de la différence entre la température de départ de la chaudière à bois (plage caractéristique d'environ 80°C à 95°C) et la température de retour du réseau de chaleur pour une température à adopter de -10°C par exemple (plage caractéristique d'environ 35°C à 65°C). La différence de température utile (ΔT) au niveau de l'accumulateur peut donc se situer dans une plage d'environ 15°C à 50°C ; il résulte de la formule 3 différents facteurs en litres par kW_{PCN} permettant de calculer la capacité de stockage (voir tableau 1 et illustration 2) :

$$\text{Capacité de stockage [l/kW]} = \text{PCN [kW]} * 0,86 / \Delta T \quad (3)$$

Dans le cas d'une grande différence de température utile de 40°C par exemple, la capacité de stockage requise peut donc être deux fois moins importante que dans le cas d'une faible différence de température utile de seulement 20°C.

Les recommandations de QM bois pour le dimensionnement de l'accumulateur s'appliquent également aux installations de plus de 500 kW_{PCN} [7][8]. En plus de l'accumulateur, QM bois exige aussi un système intelligent de gestion de la charge de l'accumulateur. Il s'appuie sur le repérage de l'état de charge de l'accumulateur via un minimum de cinq sondes de température placées dans l'accumulateur, et sur la régulation de l'état de charge au niveau d'une valeur de consigne constante grâce à la modulation lente de la puissance de la chaudière à bois. Ce système permet à la chaudière d'atteindre des longues durées de fonctionnement et de limiter le nombre de cycles de démarrage/mise à l'arrêt. Ces prescriptions s'appliquent aux systèmes destinés à produire de la chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Dans le cas des installations fournissant exclusivement de la chaleur destinée aux processus industriels ou commerciaux et dans le cas explicite d'un chauffage au bois avec exploitation stable, l'accumulateur peut être dimensionné selon d'autres critères.

- La recommandation Cercl'Air n° 31p [2] prescrit pour les chaudières automatiques au bois de plus de 70 kW_{PC} des accumulateurs de chaleur d'au moins 25 litres par kW_{PC}. Pour les chauffages au bois de plus de 500 kW_{FWL}, un accompagnement de projet avec QM bois_Standard ou QM

bois_Simplifié est également recommandé. Si la capacité de stockage calculée selon le QM bois est inférieure aux 25 litres recommandés par kW_{PCN} , la capacité de stockage exigée par le QM bois doit être déterminante. Pour les chauffages automatiques au bois d'une puissance supérieure à 70 kW, l'autorité peut, en dérogation à l'annexe 3, ch. 523, OPair, fixer des capacités de stockage inférieures si des raisons techniques ou d'exploitation l'exigent. Le nombre de démarrages en relation avec la charge thermique journalière minimale (directives Chauffages au bois Suisse et QM bois) peuvent également être utilisés comme critères pour le dimensionnement du volume d'accumulation :

- Le nombre de démarrages par an doit être surveillé au moyen de compteurs.
- Les exigences selon la fiche technique 11/1 de la FSIB (non disponible actuellement) sont applicables.
- En cas de fonctionnement à faible charge, les exigences selon la FAQ 12 de QM bois [9] s'appliquent.
- Le volume minimal de stockage dans les installations à plusieurs chaudières doit être conçu pour atteindre au moins $\frac{2}{3}$ de la puissance calorifique nominale totale (somme de toutes les chaudières).
- Remarques :
 - Définition du démarrage : lorsque, en cas de besoin de chaleur, on allume le feu avec l'allumage ou que l'on démarre à partir du mode d'entretien du lit de braises, de manière à obtenir un fonctionnement en feu (voir également le rapport "Évaluation des chauffages automatiques au bois au moyen de mesures à long terme" [10]).
 - Il faut s'efforcer de respecter les recommandations relatives aux démarrages par an selon la fiche technique 11/1 de la FSIB¹ (moins de 1000 démarrages par an jusqu'à 100 kW_{PC} et moins de 500 démarrages par an pour les puissances supérieures²) et la FAQ 8 de QM bois (5 démarrages par jour maximum). Pour les installations à plusieurs chaudières, le nombre de démarrage par an se réfère à la somme des enclenchements de tous les chaudières.

¹ En raison de la publication déjà ancienne de cette fiche technique et des changements importants survenus depuis lors dans l'état actuel de la technique et dans les concepts d'exploitation des chaudières à bois, cette fiche technique a été retirée par Chauffages au bois Suisse.

² La recommandation de moins de 500 démarrages par an pour les "grandes puissances" dans la fiche technique 11/1 de la FSIB, qui a été retirée, date de l'époque où, pour les puissances supérieures à 500 kW_{NWL} , on trouvait principalement sur le marché des chauffages industriels qui, en règle générale, présentent de nombreuses heures de fonctionnement et peu de phases de démarrage et d'arrêt.

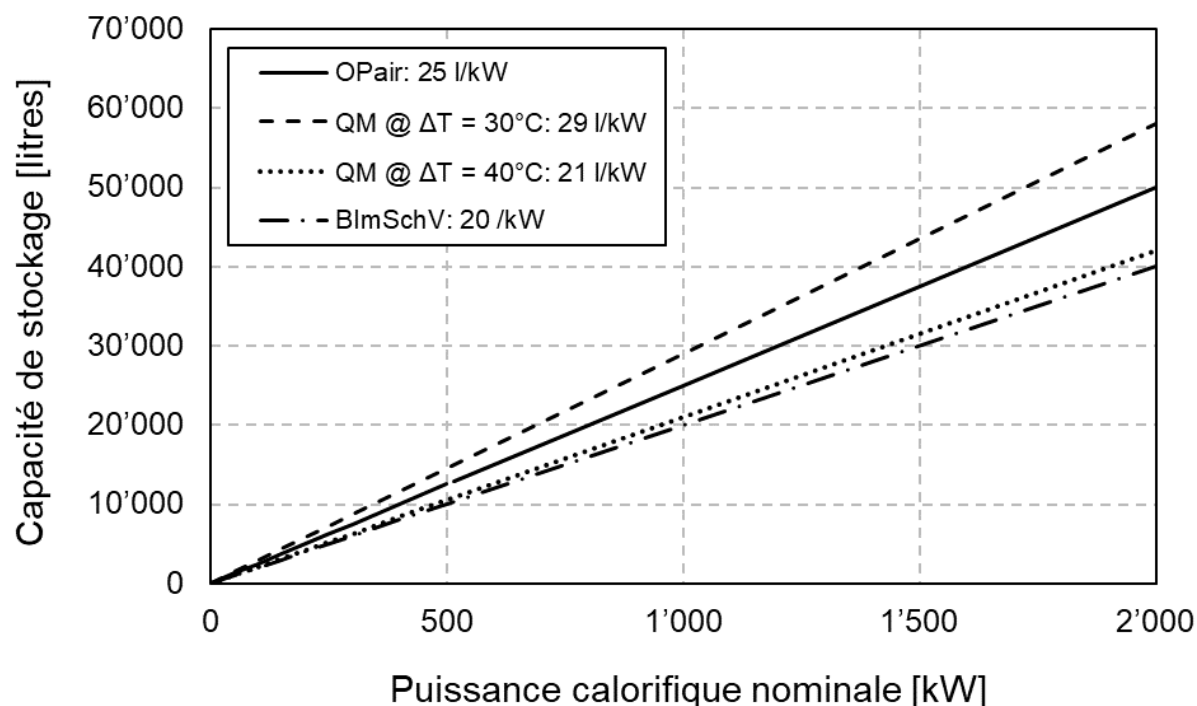


Illustration 2 : Capacité de stockage en fonction de la puissance calorifique nominale, calculée à partir de différentes formules (voir tableau 1).

Tableau 1 : Vue d'ensemble des réglementations et recommandations pour le dimensionnement de l'accumulateur des chaudières à bois à chargement automatique.

Réglementation/recommandation	Capacité de stockage	Domaine d'application
Ordonnance sur la protection de l'air (OPair)	≥ 25 [l/kW _{PCN}]	Plaquettes de bois 0 – 500 kW _{PCN} Granulés 70 kW _{PC} – 500 kW _{PCN} Chaudières à bois > 500 kW _{PCN}
Recommandation Cercl'Air n° 31p *	≥ 25 [l/kW _{PCN}]	Chaudières à bois > 70 kW _{PCN}
1 ^{re} BImSchV (Allemagne)	≥ 20 [l/kW _{PCN}]	4 – 1 000 kW _{PCN}
QM Chauffages au bois ** - ΔT au niveau de l'accumulateur de 25°C - ΔT au niveau de l'accumulateur de 30°C - ΔT au niveau de l'accumulateur de 35°C - ΔT au niveau de l'accumulateur de 40°C	≥ 34 [l/kW _{PCN}] ≥ 29 [l/kW _{PCN}] ≥ 25 [l/kW _{PCN}] ≥ 21 [l/kW _{PCN}]	70 kW _{PCN} – 10 MW _{PCN}

* Exceptions : les installations de combustion existantes, dotées d'une capacité de stockage trop petite ne sont pas soumises à l'obligation d'assainissement si le nombre des démarrages par jour de chauffage est inférieur à 3 à 5, si le nombre de démarrage par an est inférieur à 1000 pour les installations jusqu'à 100 kW_{PC} et inférieur à 500 pour les installations de plus de 100 kW_{PC}, si l'entraînement à faible charge selon FAQ 12 QMH [9] est respecté et si la disponibilité minimale de 90% des systèmes de captage des poussières est prouvée et respectée.

** [l/kW] = puissance calorifique nominale [kW] * 0,86 / ΔT * 1000.

A.3 Capacité de stockage pour les installations avec plusieurs chaudières à bois

Les exigences de QM bois pour le dimensionnement de l'accumulateur sont les suivantes :

- Ces prescriptions s'appliquent aux systèmes destinés à produire de la chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire.
- Pour les installations fournissant exclusivement de la chaleur destinée aux processus industriels ou commerciaux et dans le cas explicite d'un chauffage au bois avec exploitation stable, l'accumulateur doit être dimensionné selon d'autres critères.
- La température à adopter tient compte de la différence de température ΔT au niveau de l'accumulateur (en haut et en bas ; voir tableau 1).
- Les accumulateurs pour capteurs solaires thermiques et l'eau chaude sanitaire ne doivent pas affecter la capacité de stockage de la chaudière à bois.
- Pour deux chaudières à bois de la même ou de différente PCN :
 - o La capacité de stockage doit être dimensionnée pour au moins une heure de fonctionnement aux $\frac{2}{3}$ de la PCN totale des deux chaudières à bois.
 - o Capacité de stockage $[I] = \frac{2}{3} * \sum PCN [kW] * x [l/kW]$
 - Exemple : chaudière à bois 1 dotée de 400 kW_{PCN} et chaudière à bois 2 dotée de 800 kW_{PCN}
 ΔT au niveau de l'accumulateur = 30°C → $x = 29 \text{ l/kW}$ (voir tableau 1).
Capacité de stockage $[I] = \frac{2}{3} * (400 \text{ kW}_{PCN} + 800 \text{ kW}_{PCN}) * 29 \text{ l/kW} = 23\,200 [I]$
- Jusqu'à présent, l'expérience manque encore pour les installations avec trois chaudières à bois ou plus, affichant une puissance calorifique nominale identique ou différente. Dès que des études approfondies correspondantes seront disponibles du projet HoKaSpe³, QM bois publiera des exigences concernant le dimensionnement de leur accumulateur et leur mise en cascade. Sur la base des principes précédents, QM bois recommande, pour l'instant, le dimensionnement de stockage suivant :
 - o La capacité de stockage doit être dimensionnée pour au moins une heure de fonctionnement aux $\frac{2}{3}$ de la PCN totale de toutes les chaudières à bois.
 - o Capacité de stockage $[I] = \frac{2}{3} * \sum PCN [kW] * x [l/kW]$
 - Exemple : 3 chaudières à bois de chacune 500 kW_{PCN},
 ΔT au niveau de l'accumulateur = 30°C → $x = 29 \text{ l/kW}$ (voir tableau 1).
Capacité de stockage $[I] = \frac{2}{3} * 3 * 500 \text{ kW}_{PCN} * 29 \text{ l/kW} = 29\,000 [I]$
- Le facteur x utilisé pour le calcul de la capacité de stockage doit être au moins égal à 25 l/kW_{PCN}. Si le projet est géré avec QM bois, c'est la capacité de stockage calculée par QM bois qui doit être déterminante.

Selon la recommandation Cercl'Air n° 31p [2], pour les chauffages automatiques de plus de 70 kW_{PC} avec plusieurs chaudières, la capacité de stockage minimal doit être conçu pour atteindre au moins $\frac{2}{3}$ de la puissance calorifique nominale totale (somme de toutes les chaudières).

A.4 Gestion de projet avec QM Chauffages au bois®

La gestion de projet avec QM Chauffages au bois® (QM bois) est un service proposé aux maîtres d'ouvrage qui souhaitent, par exemple, installer un nouveau réseau de chauffage à distance équipé de chaudières à bois ou remplacer une centrale de chauffe existante par des chaudières à bois. Lors de la phase de planification, la gestion de la qualité garantit que le dimensionnement de la production de chaleur et de son système de distribution répond aux exigences de QM bois et, au cours de la première

³ Dans le projet "Chaudières à bois en cascade avec accumulateur" (HoKaSpe), trois installations en cascade sont étudiées de manière approfondie dans la pratique et l'influence de différents paramètres est mise en évidence à l'aide de simulations de modèles. Le projet doit permettre d'élaborer des bases pour le dimensionnement de la chaudière et la capacité de stockage, ainsi que pour le fonctionnement optimal des installations en cascade du point de vue de la technique de régulation.

année d'exploitation, que l'installation remplit les prérequis de QM bois pour un fonctionnement efficace avec peu d'émissions.

Il existe plusieurs procédures de suivi de projet avec QM bois : QMmini, QM bois_Simplifié et QM bois_Standard. Leurs domaines d'application sont présentés par l'illustration 3.

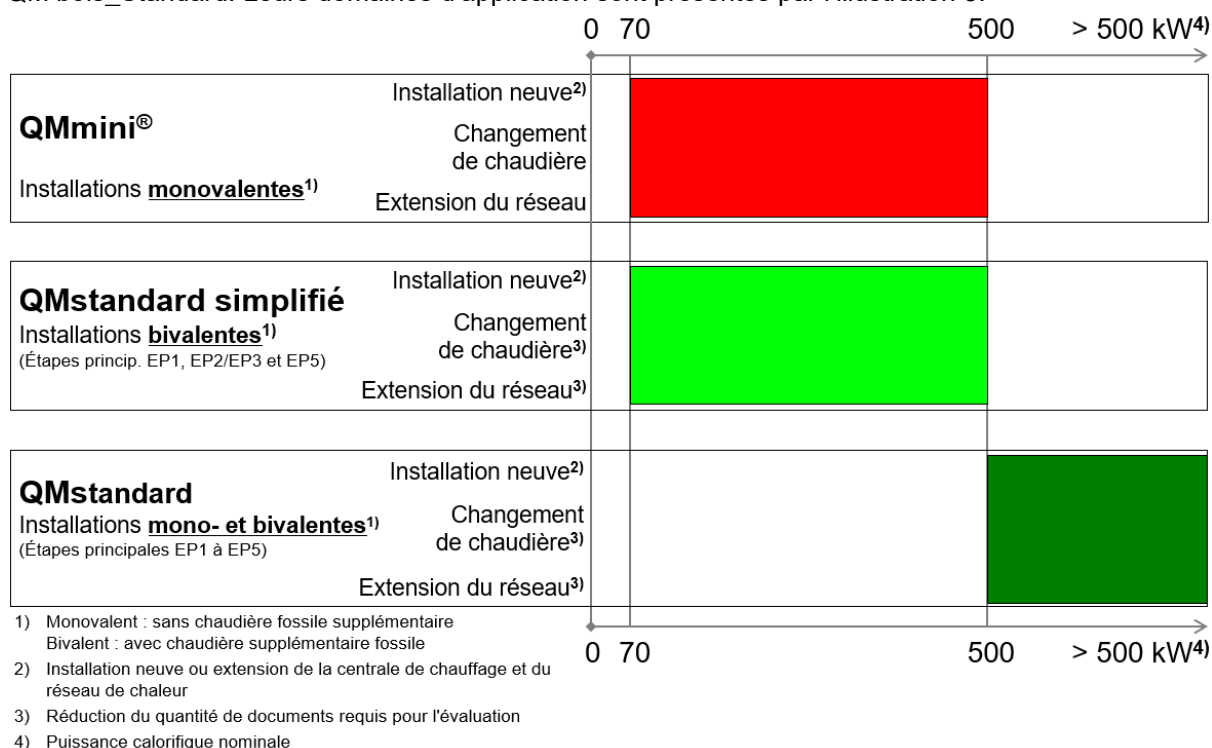


Illustration 3 : Domaine d'application de QM Chauffage au bois® (version standard et version simplifiée) et de QMmini® en fonction de la puissance calorifique nominale.

De plus amples informations sont disponibles sur le site Internet suivant : <https://www.qm-chauffage-bois.ch>

Littérature

- [1] *Ordonnance sur la protection de l'air (OPair)*, Etat le 01.01.2022, disponible sur: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/fr (dernier accès le 01.02.2022).
- [2] *Recommandation Cercl'Air n° 31p - Fiches d'exécution « Surveillance des émissions », Chauffages au bois d'une puissance calorifique supérieure à 70kW_{PC}*, Etat: janvier 2022, disponible sous <https://cerclair.ch/assets/pdf/31p-2022-01-F-Chauffages-au-bois-superieure-70kW.pdf> (dernier accès : 22.02.2022).
- [3] *SN EN 303-5:2021 Chaudières de chauffage - Partie 5: Chaudières spéciales pour combustibles solides, à chargement manuel et automatique, puissance utile inférieure ou égale à 500 kW - Définitions, exigences, essais et marquage.*
- [4] *Suisse énergie, Aide au dimensionnement chauffages au bois*, 2015, disponible sur: <https://www.suisseenergie.ch/technique-du-batiment/> (dernier accès le 11.04.2022).
- [5] *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (1. BImSchV)*, 26.10.2010, disponible sur : http://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_1_2010/index.html (dernier accès le 03.05.2019).
- [6] *Vierundvierzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über mittelgroße Feuerungs- Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen - 44. BImSchV)*, 13.06.2019, disponible sur : https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_44/BJNR080410019.html (dernier accès le 15.03.2022).
- [7] *QM Chauffages au bois : Guide QM*, Collection Chauffages au bois Tome 1, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing, 3. Édition 2011 / Traduction 2016, ISBN 978-3-937441-96-4, disponible sur : <https://www.qm-chauffage-bois.ch/publications.html>.
- [8] *QM Chauffages au bois : Solutions standard Partie I*, Collection QM Chauffages au bois Tome 2, C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing, 2. Édition 2010 / Traduction 2016, ISBN 978-3-937441-98-0, disponible sur : <https://www.qm-chauffage-bois.ch/publications.html>.
- [9] *QM Chauffages au bois, FAQ 12 - Quelle doit être la charge minimale d'une chaudière à bois en fonctionne-ment à faible charge?* 2009, disponible sur : <https://www.qm-chauffage-bois.ch/faq.html> (dernier accès le 12.08.2019).
- [10] *Lauber A., Good J., and Nussbaumer Th., Beurteilung von automatischen Holzfeuerungen mittels Langzeitmessungen im Praxisbetrieb*, Office Federale de l'Energie, Berne 14.7.2016. 2016.