

ARTICLES

Les émissions atmosphériques des chaufferies biomasse < 10 MW Synthèse des résultats de trois campagnes de mesures

Air emissions of small-scale (< 10 MW) biomass boilers Review of three field tests

Erwan AUTRET*



Vue générale (Gonfreville, 76).



Chaudière.



Silo à combustibles.



Point de mesure des rejets atmosphériques.

Chaufferie de Gonfreville (76) [Source : ADEME].

* Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) – 20, avenue du Grésillé – BP 90406 – 49004 Angers Cedex 01 –
E-mail : erwan.autret@ademe.fr

Résumé

Les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, via le développement de la biomasse énergie pour la production de chaleur dans les secteurs collectifs, tertiaires et industriels, sont *a priori* compatibles avec les engagements d'amélioration de la qualité de l'air, si le concept de combustion propre de biomasse est appliqué. Cet article présente les niveaux réels des émissions de polluants atmosphériques de chaufferies biomasse de puissance inférieure à 10 MW à partir d'une synthèse des résultats de trois campagnes de mesures réalisées entre 2007 et 2009. Un panel de 31 chaufferies représentatives de l'hétérogénéité de sites aujourd'hui en fonctionnement (nature de combustible, puissance, système de dépoussiérage...) a été constitué. Les résultats sont confrontés aux exigences réglementaires en vigueur et en projet. La synthèse montre que la maîtrise de la qualité du combustible et du fonctionnement de l'installation (en particulier l'étape de combustion et le traitement des fumées) est nécessaire pour assurer de faibles émissions de polluants organiques (CO, COV totaux et non méthaniques, et polluants organiques persistants tels que PCDD/F, HAP, PCB, HCB), de SO₂, de NO_x, de particules fines, de métaux. Les choix de conception (puissance, système de dépoussiérage) ont également un impact majeur sur les émissions de composés organiques et les particules. La grande majorité des sites présentent des émissions très faibles. Des recommandations sont toutefois formulées pour poursuivre le développement des chaufferies biomasse de petites puissances, afin qu'il soit respectueux de la qualité de l'air et efficace pour lutter contre le réchauffement climatique.

Mots clés

Biomasse. Bois. Énergie. Chaudière. Chaufferie. Émission. Qualité de l'air.

Abstract

Objectives of greenhouse gases emission reduction, which encourages bioenergy development for heat purposes, are compatible with air-quality policies if the concept of clean biomass combustion is applied. This paper presents actual emission levels of atmospheric pollutants of small-scale (< 10 MW) biomass boilers from a review of three field tests carried out between 2007 and 2009. 31 biomass boilers have been audited to cover the large diversity of sites under operation in terms of fuels, power, flue-gas cleaning devices... Results are compared to actual and forecasted regulations. The review shows that fuel quality and operation are key issues to ensure low emissions of organic pollutants (OC, VOC, CnHm, PCDD/F, PAH, PCB, HCB), SO₂, NO_x, fine particulate matters, metallic compounds. Installation design (power, flue-gas cleaning technology) also has a major impact on organic pollutants and fine particulate matter emissions. A large majority of boilers have very low emission levels. Guidelines are finally stated to keep on promoting small-scale biomass boilers in order to be air-quality compatible and efficient to fight climate change.

Keywords

Biomass. Wood. Energy. Boiler. Emission. Air quality.

Introduction

Le bois constitue une source d'énergie renouvelable particulièrement utile pour réduire le recours aux combustibles fossiles et diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Son utilisation est désormais clairement encouragée avec des aides d'État significatives accordées aux collectivités locales et aux industriels dans le cadre de la mise en œuvre de la politique de soutien aux énergies renouvelables. La programmation pluriannuelle des investissements de production de chaleur [1] prévoit ainsi une augmentation significative de la production de chaleur à partir de biomasse dans les secteurs collectif, tertiaire et industriel : 1 400 ktep* en 2006, 2 500 ktep en 2012 (+ 72 % entre 2006 et 2012) et 5 200 ktep en 2020 (+ 271 % entre 2006 et 2020). Engagement majeur du Grenelle Environnement, le fonds chaleur est doté d'un milliard d'euros sur trois ans (2009-2011) et contribue aux objectifs du Paquet européen climat-énergie qui consistent à porter la part des énergies renouvelables à 23 % de la consommation énergétique nationale d'ici 2020.

Mais la combustion du bois, si elle n'est pas réalisée dans des conditions satisfaisantes, peut constituer une source importante de polluants atmosphériques, notamment en ce qui concerne les particules fines et les composés organiques. Il est donc légitime de s'interroger sur les émissions réelles des chaufferies aujourd'hui mises en service sur le territoire national.

Les données disponibles dans la bibliographie [2, 3] sont limitées et ne précisent pas en règle générale les caractéristiques des chaufferies (taille, type de grille et dispositif de traitement des fumées, rendement), les conditions de fonctionnement (nature et caractéristiques du combustible, taux de charge...) et les conditions de réalisation des mesures de polluants (normes de prélèvement et d'analyse). Difficile dans ces conditions d'évaluer si la combustion de la biomasse est aussi vertueuse pour améliorer la qualité de l'air que pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

La campagne de mesures la plus récente [4, 5] a été réalisée en 2004 sur un panel de dix chaufferies collectives au bois avec des mesures de polluants

* ktep = kilo tep ou 1000 tep ; 1 tep = 1 tonne équivalent pétrole = 11 630 kWh.

classiques réglementés. Depuis, trois nouvelles campagnes de mesures ont été lancées par l'ADEME en 2007, 2008 et 2009 sur un panel de 31 chaufferies biomasse au total [5, 6, 7]. Ces campagnes avaient pour objectifs d'évaluer les performances réelles de chaufferies utilisant différents types de biomasse (paille et bois sous les formes suivantes : plaquettes forestières, connexes de l'industrie du bois et produit bois en fin de vie) et recourant à différents systèmes de traitement de particules (multicyclones, filtre à manches, électrofiltre). De nouveaux résultats sont ainsi disponibles pour les polluants classiques (CO, COVNM, COVT, SO₂, NO_x et TSP), mais aussi, et pour la première fois, des résultats de polluants non réglementés (PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀, HAP, PCDD/F, PCB indicateurs et PCB type dioxines, HCB, C₆H₆ et métaux lourds).

Cet article présente une synthèse des résultats agrégés de ces trois campagnes, avec une évaluation des impacts du combustible, de la combustion et du système de traitement des fumées sur la qualité des rejets atmosphériques. Il fournit un état des lieux complet des performances et des émissions atmosphériques de chaufferies bois de puissance inférieure à 10 MW en fonctionnement en 2007-2009 et représentatives de la filière biomasse énergie actuellement soutenue par les pouvoirs publics.

Les résultats sont également présentés au regard des exigences de la réglementation relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) qui fixe, en fonction de la puissance thermique des installations, des valeurs limites d'émissions pour un certain nombre de polluants. Cette synthèse apporte en particulier un nouvel éclairage sur les questions suivantes :

- Quels sont les résultats des valeurs réelles d'émissions de CO, COVNM, COVT, SO₂, NO_x et TSP par rapport aux valeurs limites réglementaires ?
- Quelles sont les performances des chaufferies de puissance inférieure à 2 MW, non soumises à la réglementation ICPE ?
- Quels sont les niveaux d'émission des polluants non réglementés : PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀, HAP, PCDD/F, PCB indicateurs et PCB type dioxines, HCB, C₆H₆ et métaux lourds ?

En fin d'article, des recommandations sont formulées pour prévenir la formation de polluants et mieux traiter les polluants formés, afin de promouvoir et généraliser le concept de combustion propre, à savoir : un combustible de qualité dans une installation conçue selon les meilleures techniques disponibles à un coût acceptable et exploitée en accord avec les bonnes pratiques.

1. Méthodologie

Les trois campagnes de mesures (C1, C2 et C3) ont été réalisées successivement lors des saisons de chauffe 2007, 2008 et 2009 par des prestataires différents et indépendants retenus par l'ADEME. Les principales caractéristiques des sites retenus (type de chaufferie, année de mise en service, puissance, système de dépoussiérage) et la nature des combustibles utilisés sont présentées dans le tableau 1.

Il s'agit majoritairement d'installations collectives mises en service récemment (2/3 des installations mises en service en 2005 ou après), de petite puissance (min = 0,32 MW ; max = 6 MW ; moy = 2,0 MW ; écart type = 1,4 MW) équipées pour la plupart (2/3) de multicyclones seul pour traiter les poussières. Les installations équipées de filtres à manches ou électrofiltres ont principalement été expertisées lors de la campagne C2 et sont de puissance plus importante.

L'évaluation des performances énergétiques des chaudières (rendement, taux de charge), des caractéristiques du combustible (PCI, taux de cendre) et des cendres (teneur en carbone) a été réalisée systématiquement*.

Les paramètres classiques (débit gazeux, température, concentrations d'O₂, CO₂, H₂O, CO, SO₂, NO_x et TSP) ont été mesurés sur les trois campagnes. Les COVNM ont été mesurés pour C1 et les COVT pour C3. Des analyses spécifiques de polluants non réglementés (PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀, HAP, PCDD/F, PCB indicateurs et PCB type dioxines, HCB, C₆H₆, métaux lourds) ont été réalisées lors des campagnes C1 et C3 (cf. Tableau 2).

2. Résultats

Les tableaux 3, 4 et 5 présentent l'ensemble des résultats des émissions de polluants mesurées lors des campagnes. Ils sont comparés aux valeurs limites d'émission (VLE) réglementaires en vigueur, lorsqu'elles existent.

NOTA : toutes les concentrations sont exprimées sur gaz sec, à 11 % O₂. Les résultats des performances énergétiques sont disponibles dans les rapports détaillés des campagnes de mesures.

2.1. La qualité du combustible a un impact sur les émissions SO₂, de poussières et de métaux

La qualité du combustible (origine, taux de cendre) peut avoir un impact plus ou moins marqué sur les émissions de dioxyde de soufre (SO₂), de particules et de métaux.

* À noter dans la campagne C1, une évaluation détaillée des caractéristiques du combustible (PCS, taux de cendre, granulométrie, humidité, teneurs en organohalogénés, teneurs en métaux) et des cendres (valeur agronomique et fertilisante, radioéléments, PCDD/F, granulométrie et pourcentage d'indésirables).

Les résultats des campagnes montrent globalement des rejets de SO_2 extrêmement faibles, largement inférieurs à la VLE de 200 mg/Nm^3 , hormis deux cas particuliers avec des valeurs exceptionnelles de 190 et 208 mg/Nm^3 dues à des approvisionnements en combustibles inappropriés et qui sont susceptibles d'entraîner des problèmes sévères de corrosion dans la chaudière. En écartant ces deux valeurs, la moyenne des émissions de SO_2 est évaluée à 10 mg/Nm^3 . À noter les émissions plus élevées de SO_2 dans le cas du site de combustion de paille (150 mg/Nm^3).

Le taux de cendres du combustible peut avoir dans certains cas un impact défavorable sur les émissions de particules. À l'inverse, des émissions importantes de particules ne sont pas nécessairement corrélées à un taux de cendres élevé. Le taux de cendres moyen est évalué à $1,9 \%$, avec la quasi-totalité des valeurs inférieures à $4,0 \%$ (3 sites seulement sur 31 ont des valeurs entre 4 et 12%). Le site C2-10, qui présente un taux de cendres égal à 12% , présente aussi des émissions importantes de particules (374 mg/Nm^3). Ce genre de situation reste cependant marginal.

Les émissions de métaux sont le reflet de la composition des combustibles. Elles sont faibles et bien inférieures aux seuils réglementaires existants. Il n'a pas été détecté de chrome VI dans les émissions, à l'exception d'une valeur de l'ordre de la limite de détection (site C1-3 avec $0,001 \text{ mg/Nm}^3$), les teneurs en chrome total dans les rejets étant par ailleurs faibles. Le manganèse et le zinc sont les composés les plus présents dans les combustibles, ce sont aussi les composés majoritaires dans les émissions mais en ordre inversé : le zinc, étant plus volatil que le manganèse, a une concentration supérieure dans les émissions.

2.2. L'étape de combustion a un impact sur les émissions des polluants réglementés : CO, COVNM, COVT et NO_x

La combustion est l'étape clé à maîtriser pour éviter et limiter la formation de polluants organiques. À ce stade, de nombreux paramètres interagissent. Les règles de base à respecter, communément regroupées sous le nom de règle des 4T, sont [8] :

- Température : pour avoir une combustion totale, il est nécessaire d'atteindre un niveau de température minimum qui fournisse à la fois une énergie suffisante pour entretenir une dégradation complète de la biomasse et les réactions d'oxydation des gaz produits ;
- Teneur en oxygène : pour s'assurer que tous les gaz produits par la pyrolyse de la biomasse soient oxydés, une des solutions consiste à mettre beaucoup plus d'oxygène (donc d'air) que nécessaire. C'est ce que l'on appelle la combustion avec excès d'air et dans tous les appareils de combustion, cette pratique est réalisée ;

- Turbulence : pour favoriser les contacts entre les gaz de pyrolyse et l'oxygène, une des solutions utilisées consiste aussi à optimiser le mélange. Ce principe est difficilement quantifiable, mais l'augmentation des vitesses est une des voies avec l'augmentation des débits d'air secondaires ;

- Temps de séjour : même si les réactions d'oxydation sont extrêmement rapides et ne nécessitent pas un temps important, l'augmentation du temps de séjour favorise une oxydation complète des gaz en permettant notamment aux différents gaz d'entrer en collision.

Le taux de CO est le premier indicateur de la (bonne) combustion de la biomasse. Quelle que soit la campagne de mesures, on constate une très grande dispersion des résultats avec un tiers environ des sites qui parviennent à maintenir des émissions inférieures à 250 mg/Nm^3 , qui est la VLE réglementaire qui s'applique aux installations de puissance comprise entre 2 et 20 MW . Ce constat, déjà mis en évidence dans la littérature [2], cache des situations particulières très contrastées, avec un nombre limité mais non négligeable de sites (6 sur 31) qui dépassent la valeur de $1\,000 \text{ mg/Nm}^3$. Les sites qui dépassent cette valeur sont tous de puissance inférieure à 2 MW , par conséquent non soumis à la réglementation ICPE. À titre de comparaison, on peut rappeler l'exigence de la norme 303-5 qui impose aux chaudières automatiques de classe 3 (la plus sévère) de puissance entre 150 et 300 kW le respect de la valeur limite de $1\,091 \text{ mg/Nm}^3$.*

Les émissions de COVNM et COVT mesurées respectivement lors des campagnes C1 et C3 sont globalement maîtrisées. Les sites qui avaient des émissions de CO anormalement élevées sont également ceux pour lesquels on observe des pics de COV.

À l'exception d'un seul site (C3-2, 837 mg/Nm^3), toutes les émissions de NO_x sont largement inférieures à la valeur limite réglementaire imposée aux installations de puissance entre 2 et 20 MW , à savoir 500 mg/Nm^3 . La valeur moyenne sur 30 sites est égale à 200 mg/Nm^3 (min = 75 ; max = 360 ; écart type = 70), soit une dispersion limitée des résultats entre 130 et 270 mg/Nm^3 . Les NO_x formés sont dus pour une part à la teneur en azote du combustible et pour l'autre part à l'oxydation du diazote de l'air comburant (N_2) en NO à haute température dans le foyer lors de l'injection d'air secondaire. La figure 1 illustre le compromis entre un excès d'air important pour une combustion la plus complète possible (et donc des émissions de CO faibles) et à l'inverse une limitation d'injection d'air pour éviter la formation de NO avec le risque d'émissions de CO élevées. On constate la difficulté de limiter simultanément les émissions de CO à un niveau inférieur à 250 mg/Nm^3 et de NO_x inférieures à 200 mg/Nm^3 : seulement deux

* $1\,091 \text{ mg/Nm}^3$ à 11% d' O_2 ou $1\,200 \text{ mg/Nm}^3$ à 10% d' O_2 qui est la valeur indiquée dans la norme.

sites (C1-3 et C2-12) parviennent à ce résultat. Globalement, les faibles émissions de CO ($< 250 \text{ mg/Nm}^3$) correspondent à des émissions de NO_x en moyenne égales à 243 mg/Nm^3 alors que des émissions de CO supérieures à 250 mg/Nm^3 correspondent en moyenne à des émissions de NO_x égales à 168 mg/Nm^3 .

2.3. L'étape de combustion a parfois un impact sur les émissions des polluants non réglementés : HAP, PCDD/F, PCB indicateurs et PCB type dioxines, HCB, C_6H_6

La campagne C1 a permis d'évaluer les rejets de PCDD/F, de PCBs (coplanaires et indicateurs), de HAPs et d'hexachlorobenzène (HCB). La campagne C3 apporte des résultats complémentaires sur les HAP et le benzène (C_6H_6), qui est, à notre connaissance, mesuré à l'émission pour la première fois en France sur des chaufferies biomasse de cette gamme de puissance. Dans la campagne C1, les PCDD/F sont exprimés en équivalent toxique (I-TEQ) selon le référentiel NATO-CCMS utilisé pour les rejets à l'émission dans les réglementations française et internationale. Les PCB coplanaires sont exprimés en équivalent toxique (OMS-TEQ) selon le référentiel OMS. Les HAP ont été quantifiés dans les campagnes C1 et C3 selon la méthodologie de l'EPA (prise en compte de 16 HAP dont des HAP légers) et selon la norme française à l'émission NFX 43 329 (prise en compte de 8 HAP).

D'une façon globale, les émissions de composés organiques semi-volatils de type PCDD/F et PCBs sont faibles, seul le site C1-8 présentant des émissions significatives (à noter que des pics de CO et COV avaient déjà été identifiés pour le site C1-8). À l'exception des sites C1-8 ($2,8 \text{ ng/Nm}^3$ I-TEQ) et C1-4 ($0,132 \text{ ng/Nm}^3$ I-TEQ), les rejets de PCDD/F sont inférieurs à $0,1 \text{ ng/Nm}^3$ I-TEQ qui est la VLE en vigueur pour les unités d'incinération* et en projet pour les chaufferies de puissance supérieure à 20 MW. Pour les autres installations, la moyenne des rejets s'établit à $0,032 \text{ ng/Nm}^3$ I-TEQ, ce qui est environ 100 fois plus faible que les niveaux observés dans le domaine de l'incinération des déchets.

Il n'a pas été détecté de PCB indicateurs sauf aux sites C1-4 et C1-9 où les composés détectés sont à la limite de détection.

Les PCB coplanaires sont à des teneurs très faibles. Leur évolution suit les rejets de PCDD/F avec les concentrations les plus élevées aux sites C1-4 et C1-8. La moyenne des rejets pour les autres installations s'établit à $0,0011 \text{ ng/Nm}^3$ OMS-TEQ. Ils représentent en moyenne 3 % de la concentration en PCDD/F I-TEQ.

Sur les deux campagnes, les HAP (16) présentent des émissions plus dispersées : entre $2 \text{ } \mu\text{g/Nm}^3$ sur le

site C3-1 et jusqu'à $91\,000 \text{ } \mu\text{g/Nm}^3$ au site C1-8. Les HAP légers (naphtalène, acenaphtalène) représentent une proportion importante des émissions. Pour les cinq émetteurs les plus importants de la campagne C1, ils représentent 63 % des rejets avec un pic au site C1-6 avec 99 % des rejets. Compte tenu de la difficulté de mesurer ces HAPs légers (ce sont des composés parfois présents dans les laboratoires), il faut garder une certaine réserve sur les résultats, en particulier pour le site C1-6.

Les rejets de HAP (8) sont moins dispersés car ce sont des composés plus lourds qui sont pris en compte. Deux installations dépassent la VLE de $100 \text{ } \mu\text{g/Nm}^3$ imposée actuellement aux chaudières présentes dans une installation nouvelle ou modifiée d'une puissance supérieure à 20 MWth (arrêté du 20/06/02) et le futur seuil de $10 \text{ } \mu\text{g/Nm}^3$ prévu dans le projet d'évolution de l'arrêté du 20/06/02 : les sites C1-8 ($4\,937 \text{ } \mu\text{g/Nm}^3$) et C1-5 ($1\,236 \text{ } \mu\text{g/Nm}^3$) qui étaient également les sites avec les plus fortes émissions de CO. Les rejets des autres sites sont nettement plus faibles avec une moyenne de $0,24 \text{ } \mu\text{g/Nm}^3$.

L'hexachlorobenzène a été recherché dans les émissions. À l'exception du site C1-8, ce composé n'a pas été détecté dans les émissions.

Les émissions de benzène sont très limitées, souvent inférieures à la limite de détection, et globalement comprise entre 0 et $0,3 \text{ mg/Nm}^3$, à l'exception d'un site (C3-4, $30,9 \text{ mg/Nm}^3$) qui présentait également le pic de CO le plus important.

2.4. Le système de traitement des fumées permet de traiter les émissions de TSP, PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ et $\text{PM}_{1,0}$

Si la maîtrise de la qualité du combustible permet de prévenir la formation de particules (cf. § 3.1), la mise en place d'un système de dépoussiérage adapté permet, lorsqu'il est bien conçu et exploité, de les traiter à un niveau acceptable. Cette partie synthétise les performances réelles des différentes technologies mais aussi les contre-performances qui ont été constatées sur plusieurs sites, équipés aussi bien de multicyclones que de filtre à manches. Les trois campagnes portent sur un panel total de 31 sites équipés de 22 multicyclones, 5 filtres à manches et 4 électrofiltres. Pour simplifier la présentation, les résultats des technologies filtre à manches et électrofiltre ont été intégrés.

Globalement, les 31 sites présentent des valeurs d'émissions de poussières conformes aux performances attendues des technologies installées et aux valeurs limites imposées par la réglementation. Cinq sites cependant, dont un équipé d'un filtre à manches, présentent des contre-performances dues à une dérive prématurée du système et à l'utilisation de combus-

* Précisons que les rejets de PCDD/F des usines d'incinération sont de l'ordre de 3 à 5 ng/Nm^3 OMS-TEQ avant traitement et que la mise en place d'un traitement (charbon actif par exemple) permet de respecter la valeur limite de $0,1 \text{ ng/Nm}^3$ OMS-TEQ ; aucun site évalué dans la campagne C1 n'est équipé d'un traitement des dioxines.

tible inadapté (113 mg/Nm³ pour le site équipé d'un filtre à manche percé, 374 à 583 mg/Nm³ pour les quatre sites avec multicyclones).

La moyenne des émissions de poussières des sites équipés de filtre à manches ou électrofiltre s'établit à 13 mg/Nm³ (min = 3 ; max = 35 ; écart type = 10) pour les huit sites concernés, qui sont de puissance assez importante (3,7 MW en moyenne, entre 1,5 et 6 MW). Les filtres à manches et les électrofiltres ont des performances équivalentes. La moyenne des émissions de poussières des sites équipés de multicyclones est de 111 mg/Nm³ (min = 38 ; max = 180 ; écart type = 41) pour les 18 sites concernés, qui sont de puissance nettement plus faible (1,3 MW en moyenne, entre 0,3 et 3,5 MW).

Les rejets de poussières sont caractérisés par une proportion importante de particules fines : les PM₁₀ représentent 95 % en moyenne des rejets et les PM_{2,5} de l'ordre de 87 %. Les valeurs sont très peu dispersées, comme le montrent les très faibles écarts types obtenus : 3 et 6 % respectivement pour les PM₁₀ et les PM_{2,5}. La dispersion des résultats augmente pour les PM_{1,0} avec une moyenne évaluée à 73 % (min = 51 % ; max = 98 % ; écart type = 16 %). Enfin, aucun impact du système de dépoussiérage n'a pu être mis en évidence sur la granulométrie des particules.

3. Conclusion et recommandations pour une combustion propre de biomasse

Les trois campagnes de mesures ont été réalisées sur un panel de 31 chaufferies biomasse de puissance inférieure à 10 MW, représentatives de l'hétérogénéité des sites aujourd'hui en fonctionnement et aidés par les pouvoirs publics dans le cadre du développement de la biomasse énergie.

Les principales caractéristiques des sites qui impactent sur les rejets atmosphériques sont la puissance de l'installation, la nature et la qualité du combustible, le dimensionnement, la maîtrise de l'étape de combustion et la technologie de traitement des poussières.

Les campagnes sont complémentaires, que ce soit au niveau des caractéristiques des sites et des polluants mesurés. Les concentrations d'O₂, de CO₂, d'H₂O, de CO, de SO₂, de NO_x, de particules totales ont été mesurées lors des trois campagnes, les COVNM mesurés en campagne C1 et les COVT en C3. D'autre part, et pour la première fois à notre connaissance sur de telles installations, ces campagnes ont permis de mesurer des polluants non réglementés, à savoir les PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM₁₀, les HAP, les PCDD/F, les PCB indicateurs et PCB type dioxines, le HCB, le benzène et les métaux lourds.

Globalement, les résultats de ces campagnes montrent que les niveaux de rejets sont maîtrisés. Les niveaux moyens d'émissions sont conformes aux valeurs limites d'émission réglementaires en ce qui

concerne les COV, les particules, le SO₂ et les NO_x. Les émissions de CO sont plus dispersées avec une valeur limite d'émission réglementaire dépassée dans 2/3 des situations. L'étude met en évidence la difficulté de la gestion de l'air pour prévenir simultanément la formation de CO et de NO_x.

Les sites non soumis à la réglementation (puissance inférieure à 2 MW) respectent en règle générale les exigences qui s'imposent aux sites de puissance plus importante.

Pour les métaux, les HAP et les PCDD/F, qui ne sont pas réglementés dans cette gamme de puissance, on constate que les niveaux d'émission sont faibles et déjà inférieurs aux exigences qui s'imposent aux installations de moyenne puissance (> 20 MW).

Pour les autres polluants non réglementés (PCB indicateurs et PCB type dioxines, le HCB, le benzène), ces campagnes apportent de nouvelles connaissances avec des niveaux faibles d'émission lorsque la combustion est maîtrisée.

Un nombre limité de sites pose problème, que ce soit au niveau des émissions anormalement élevées de poussières totales ou de composés organiques. On constate que les quelques sites qui présentent des pics de CO et COV ont également des valeurs anormales de PCDD/F, PCB coplanaires, HAP, HCB et/ou benzène. Ce sont généralement des sites de faible puissance (< 2 MW).

Concernant les poussières totales et les particules fines (PM_{1,0}, PM_{2,5} et PM₁₀), les campagnes confirment :

- les performances moyennes des multicyclones (entre 70 et 150 mg/Nm³) ;
- les bonnes performances des filtres à manches ou électrofiltre (entre 3 et 35 mg/Nm³) ;
- l'importance de la qualité du combustible ;
- la proportion importante de particules fines de type PM₁₀ (95 % des particules totales) et PM_{2,5} (87 % des particules totales) ; la proportion de PM_{1,0} est plus faible (73 %) et plus variable.

L'ensemble de ces observations amène aux conclusions et recommandations suivantes : le développement de la biomasse énergie, notamment dans le cas de chaufferies de petites puissances (de quelques centaines de kW à quelques MW), est possible et même compatible avec le respect d'un niveau élevé d'exigences sur les rejets atmosphériques, à condition d'accorder la plus grande vigilance aux règles de la combustion propre. À l'inverse, des rejets significatifs de polluants organiques et particuliers sont à craindre en cas de recours à des combustibles inappropriés, à des installations inadaptées et en l'absence de maîtrise du fonctionnement des installations.

Afin d'optimiser le développement des chaufferies biomasse de petite puissance (< 10 MW), nous recommandons :

- une meilleure maîtrise de la qualité des approvisionnements ;

- une meilleure analyse des besoins et suivi de l'efficacité énergétique pour éviter les surdimensionnements ;
- une meilleure maîtrise du fonctionnement des installations, en particulier de l'étape de combustion et des technologies de filtration des poussières de type filtre à manches et électrofiltre ;
- une formation à la conduite des installations pour prendre en compte les spécificités des chaudières biomasse ;

- la capitalisation de retours d'expériences technico-économiques de sites équipés des meilleures techniques disponibles de réduction des émissions de particules et de NO_x ;
- la poursuite de programmes structurés d'animation et d'accompagnement de recherche préindustrielle sur la combustion propre de biomasse aux niveaux français et européen.

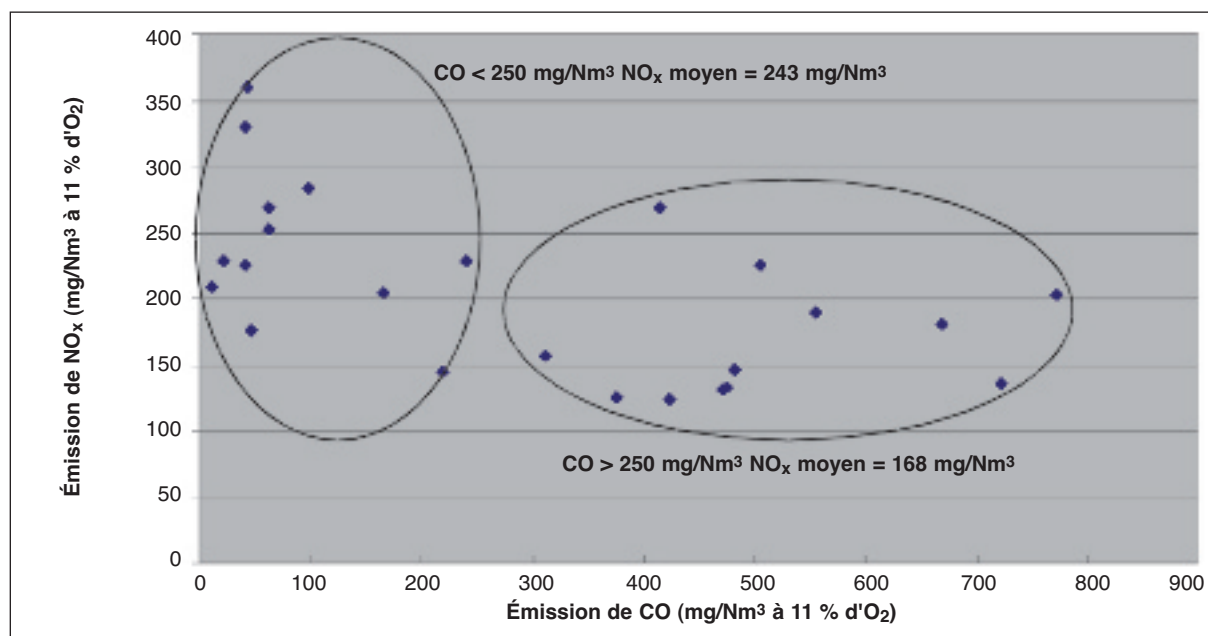


Figure 1.
Corrélation entre émissions de NO_x et CO.

Tableau 1.
Présentation des chaufferies expertisées.

Chaufferie	Type chaufferie	Mise en service	Puissance (MW)	Combustible	Système de dépoussiérage
C1-1	Collective	2005	6	Paille et bois	Filtre à manches
C1-2	Collective	2005	2,5 + 1,5	Connexes de l'industrie du bois (écorces et sciures)	Électrofiltre
C1-3	Industrielle	1993	3,5	Connexes de l'industrie du bois	Multicyclone
C1-4	Collective	2006	2,5	Préparation de connexes de l'industrie du bois, de produits bois en fin de vie et de plaquettes forestières	Multicyclone
C1-5	Collective	2006	0,45	Plaquettes forestières	Multicyclone
C1-6	Collective	2006	0,32	Produits bois en fin de vie	Multicyclone
C1-7	Collective	2002	2 x 0,75	Produits bois en fin de vie	Multicyclone
C1-8	Collective	1992	0,4	Plaquettes forestières	Multicyclone
C1-9	Collective	2004	2 x 0,45	Préparation de produits bois en fin de vie et de plaquettes forestières	Multicyclone
C2-1	Collective	2000	3,5	Produit bois en fin de vie	Électrofiltre
C2-2	Collective	2006	0,69	Plaquettes forestières	Multicyclone
C2-3	Collective	2004	2,5	Plaquettes forestières	Multicyclone
C2-4	Collective	2006	2,8	Plaquettes forestières	Filtre à manches
C2-5	Collective	2000	3,2	Préparation de produits bois en fin de vie (90 %) et de plaquettes forestières (10 %)	Électrofiltre
C2-6	Collective	2007	1,5	Plaquettes forestières	Filtre à manches
C2-7	Collective	2007	4	Préparation de connexes de l'industrie du bois, de produits bois en fin de vie et de plaquettes forestières	Électrofiltre
C2-8	Collective	2006	1,2	Connexes de l'industrie du bois	Multicyclone
C2-9	Collective	2005	2,5	Préparation de connexes de l'industrie du bois (20 %) et de produits bois en fin de vie (80 %)	Multicyclone
C2-10	Collective	2007	2,5	Plaquettes forestières	Multicyclone
C2-11	Collective	2007	2,4	Plaquettes forestières	Multicyclone
C2-12	Collective	2008	2,5	Préparation de connexes de l'industrie du bois, de produits bois en fin de vie et de plaquettes forestières	Multicyclone
C2-13	Collective	2007	2,1	Préparation de connexes de l'industrie du bois et de plaquettes forestières	Filtre à manches
C2-14	Collective	2008	3,2	Préparation de connexes de l'industrie du bois et de plaquettes forestières	Filtre à manches
C3-1	Collective	2006	1,25	Préparation de produits bois en fin de vie et de plaquettes forestières	Multicyclone
C3-2	Industrielle	1999	2,8	Produits bois en fin de vie (déchets d'usinage de panneaux MDF)	Multicyclone
C3-3	Collective	2002	0,32	Plaquettes forestières	Multicyclone
C3-4	Collective	2006	0,56	Plaquettes forestières	Multicyclone
C3-5	Collective	2004	0,56	Plaquettes forestières	Multicyclone
C3-6	Collective	2006	0,72	Préparation de connexes de l'industrie du bois et de plaquettes forestières	Multicyclone
C3-7	Collective	2006	0,54	Plaquettes forestières	Multicyclone
C3-8	Collective	2003	0,45	Plaquettes forestières	Multicyclone

Tableau 2.
Présentation des analyses spécifiques réalisées dans les campagnes C1 et C3.

Campagne/ Polluants analysés	Norme/ Méthode	Méthode de mesure (norme)
Campagne C1 :	Projet	
PM _{1,0} , PM _{2,5} , PM ₁₀	ISOCD/23210	Échantillonnage par impacteur DEKATI donnant les coupures granulométriques suivantes PM ₁₀ , PM _{2,5} , PM _{1,0}
HAP	NF X 43 329	Échantillonnage des fumées par sonde de prélèvement Prélèvement sur filtre et cartouche adsorbant (résine XAD2)
PCDD/F	NF EN 1948	Échantillonnage des fumées par sonde de prélèvement. Prélèvement sur filtre et cartouche adsorbant (résine XAD2) Analyse par HRGC/HRMS
PCB indicateurs	NF X 43 329	Échantillonnage des fumées par sonde de prélèvement Prélèvement sur filtre et cartouche adsorbant (résine XAD2)
PCB type dioxines	NF EN 1948	Échantillonnage des fumées par sonde de prélèvement. Prélèvement sur filtre et cartouche adsorbant (résine XAD2) Analyse par HRGC/HRMS
HCB	NF X 43 329	Échantillonnage des fumées par sonde de prélèvement Prélèvement sur filtre et cartouche adsorbant (résine XAD2)
Cd, Ti, As, Se, Te, Pb, Sb, Cr, Co, Cu, Sn, Mn, Ni, V, Zn	NF EN 14385 NF X 43 051	Échantillonnage des fumées par sonde de prélèvement Prélèvement sur filtre et barboteur dans une solution de HNO ₃ -H ₂ O ₂
Hg	NF EN 13211 NF X 43 051	Échantillonnage des fumées par sonde de prélèvement Prélèvement sur filtre et barboteur dans une solution de KMnO ₄ -H ₂ SO ₄
Cr VI	-	Échantillonnage des fumées par sonde de prélèvement Prélèvement sur filtre et barboteur dans une solution spécifique
Campagne C3 :	Projet	
HAP	NFX 43 329	Méthode filtre et condenseur sans division de débit. Filtration puis condensation et absorption sur résine XAD2. Dosage en laboratoire d'analyses
C ₆ H ₆	NF EN 13649	Concentration massique en composés organiques gazeux individuels

Tableau 3.
Résultats des émissions des polluants réglementés (sur gaz sec à 11 % d'O₂).

Chaudière	Taux cendre %	TSP mg/Nm ³	SO ₂ mg/Nm ³	CO mg/Nm ³	COVNM mg/Nm ³ eq. C	COV Totaux mg/Nm ³ eq. CH ₄	NO _x mg/Nm ³
C1-1 paille	4,0	7,0	151,0	98	0,9	ND	284
C1-1 bois	3,9	16,0	< 1,1	240	1,6	ND	229
C1-2	3,6	18,0	5,0	63	57,4	ND	269
C1-3	0,6	162,0	17,0	218	90	ND	145
C1-4	0,7	127,0	36,0	43	13,3	ND	359
C1-5	0,3	121,0	0,6	7 520	907	ND	75
C1-6	0,8	99,0	0,3	424	4,4	ND	124
C1-7	0,4	71,0	6,0	555	3,1	ND	190
C1-8	0,4	55,0	ND	9 269	2 562	ND	184
C1-9	2,1	169,0	1,4	1 520	3,5	ND	323
C2-1	0,8	11,7	3,7	723	ND	ND	136
C2-2	0,8	180,0	0,4	482	ND	ND	147
C2-3	0,7	132,0	< 0,2	165	ND	ND	205
C2-4	0,6	113,0	< 0,3	312	ND	ND	157
C2-5	0,9	12,8	0,8	41	ND	ND	330
C2-6	1,1	4,9	0,7	1 029	ND	ND	149
C2-7	0,9	3,2	< 10,2	ND	ND	ND	ND
C2-8	2,4	583,0	21,0	2 131	ND	ND	234
C2-9	0,6	78,4	2,4	472	ND	ND	132
C2-10	11,9	374,0	208,0	41	ND	ND	225
C2-11	1,8	110,0	< 15,2	669	ND	ND	180
C2-12	3,9	38,2	3,8	46	ND	ND	176
C2-13	3,6	35,0	103,0	475	ND	ND	133
C2-14	3,3	6,1	190,0	21	ND	ND	228
C3-1	0,0	58,0	4,2	11	ND	0,3	209
C3-2	1,03	399,0	21,7	395	ND	5,7	837
C3-3	0,75	106,0	2,8	375	ND	5,5	125
C3-4	5,06	120,0	1,5	5 622	ND	455,0	102
C3-5	0,69	400,0	0,5	772	ND	15,1	203
C3-6	0,0	162,0	0,3	415	ND	5,4	269
C3-7	1,62	97,0	10,8	62	ND	0,1	252
C3-8	0,0	113,0	0,3	505	ND	0,5	225
VLE régl. P < 2 MW	—	—	—	—	—	—	—
2 < P < 20MW*	—	100 (150 entre 2 et 4 MW)	200	250	37,5	—	500

ND : non déterminé.

* Arrêté du 25 juillet 1997.

Tableau 4.
Résultats des émissions des polluants non réglementés (sur gaz sec à 11 % d'O₂).

Chaudière	PM ₁₀ %	PM _{2,5} %	PM _{1,0} %	16 HAP µg/Nm ³	8 HAP µg/Nm ³	PCDD/F ng I- TEQ/Nm ³	HCB ng/Nm ³	PCB coplan ng/Nm ³ OMS-TEQ	PCB indic. µg/Nm ³	C ₆ H ₆ mg/Nm ³
C1-1 paille	88,0	83,0	60	124	0,14	0,017	< 38	0,001	ND	ND
C1-1 bois	97,0	89,0	51	167	0,23	0,015	< 42	0,000	ND	ND
C1-2	97,0	90,0	66	4	0,01	0,0003	< 21	0,0003	ND	ND
C1-3	91,0	74,0	61	23	0,04	0,031	< 29	0,001	ND	ND
C1-4	96,0	91,0	77	41	0,05	0,132	< 28	0,003	< 0,055	ND
C1-5	99,3	99,7	98	29 140	1 236	0,033	< 350	0,005	ND	ND
C1-6	91,0	89,0	86	11 762	1,03	0,044	< 62	0,001	ND	ND
C1-7	93,0	87,0	56	14	0,11	0,060	< 41	0,000	ND	ND
C1-8	93,0	83,0	74	90 769	4 937	2,883	889	0,093	ND	ND
C1-9	98,0	90,0	89	145	0,31	0,055	< 101	0,004	< 0,177	ND
C3-1	ND	ND	ND	1,7	ND	ND	ND	ND	ND	< 0,2
C3-2	ND	ND	ND	9,8	ND	ND	ND	ND	ND	ND
C3-3	ND	ND	ND	9,7	ND	ND	ND	ND	ND	< 0,3
C3-4	ND	ND	ND	8 624	ND	ND	ND	ND	ND	30,9
C3-5	ND	ND	ND	273	ND	ND	ND	ND	ND	0,2
C3-6	ND	ND	ND	79,9	ND	ND	ND	ND	ND	< 0,1
C3-7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	< 0,1
C3-8	ND	ND	ND	33,1	ND	ND	ND	ND	ND	0,3
Référence réglementaire										
< 2 MW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2-20 MW	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20-100 MW*	—	—	—	—	100 (10 en projet)	(0,1 en projet)	—	—	—	—

ND : non déterminé.

< valeur : inférieure à la limite de détection.

* Arrêté du 20 juin 2002.

Tableau 5.
Résultats des émissions de métaux lors de C1 (sur gaz sec à 11 % d'O₂).

Chaudière	Somme Cd + Hg + Th mg/Nm ³	Somme As + Se + Te mg/Nm ³	Pb mg/Nm ³	Somme Ant + Ch + Co + Sn + Mn + Ni + Va + Zn mg/Nm ³
C1-1 paille	0,001	0,000	0,021	0,114
C1-1 bois	0,002	0,000	0,025	0,318
C1-2	0,000	0,000	0,006	0,147
C1-3	0,002	0,002	0,005	0,202
C1-4	0,002	0,005	0,082	0,682
C1-5	0,003	0,037	0,012	0,11
C1-6	0,007	0,046	0,032	0,556
C1-7	0,018	0,007	0,032	1,826
C1-8	0,003	0,004	0,043	0,421
C1-9	0,001	0,001	0,009	0,333
Référence réglementaire				
< 2 MW	–	–	–	–
2-20 MW	–	–	–	–
20-100 MW*	0,100	1,000	1,000	10

* Arrêté du 20 juin 2002.

Références

- [1] Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire, Direction générale de l'énergie et du climat, Programmation pluri-annuelle des investissements de production de chaleur, Période 2009-2020, Rapport en application de l'article 50 de la loi de programme du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique.
- [2] CITEPA, Estimation des émissions de polluants liées à la combustion du bois en France, mars 2003.
- [3] ADEME, 2009, Évaluation prospective 2020-2050 de la contribution du secteur biomasse énergie aux émissions nationales de polluants atmosphériques, Rapport (étude réalisée pour le compte de l'ADEME par Énergies Demain et le CITEPA).
- [4] ADEME, 2004, Expertise de dix chaufferies collectives au bois, analyse et recommandations, rapport (étude réalisée pour le compte de l'ADEME par SECHAUD Ingénierie).
- [5] ADEME, 2008, Évaluation des performances énergétiques et environnementales de chaufferies biomasse, rapport (étude réalisée pour le compte de l'ADEME par LECES, IOSIS Industries et Micro-polluants Technologie).
- [6] ADEME, 2009, Campagne de mesures de particules à l'émission de chaufferies biomasse, rapport (étude réalisée pour le compte de l'ADEME par IRH Environnement).
- [7] ADEME, 2009, Mesures de polluants sur chaufferies bois existantes en Alsace, rapport final phase 3 (étude réalisée pour le compte de l'ADEME par Bureau Veritas).
- [8] Autret E., Rogaume Y. Production de chaleur à partir de bois, émissions atmosphériques ; dossier Technique de l'Ingénieur (à paraître).