



Evaluation technique, environnementale et économique des techniques disponibles de dépoussiérage pour les chaufferies bois de puissance installée comprise entre 0 et 4 MW

Synthèse

25 septembre 2007

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par Sophie MOUSSEAU, Bureau d'Etudes INDDIGO
(Contrat N° 0701C0009)

Coordination technique : Erwan AUTRET - Département Bio-ressources – Direction des Energies
Renouvelables, des Réseaux et des Marchés Energétiques, ADEME Angers

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

L'ADEME en bref :

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la tutelle conjointe des ministères de l'Ecologie et du Développement durable, de l'Industrie et de la Recherche. Elle participe à la mise en oeuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement et de l'énergie. L'agence met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public et les aide à financer des projets dans cinq domaines (la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit) et à progresser dans leurs démarches de développement durable.

<http://www.ademe.fr>

Sommaire

1	INTRODUCTION	5
2	METHODOLOGIE	7
3	EVALUATION QUALITATIVE DES PERFORMANCES DES SYSTEMES DE DEPOUSSIERAGE	8
3.1	Multicyclone	8
3.2	Filtre a manches.....	8
3.3	Electrofiltres	9
3.4	Bilan avantages / inconvenients.....	9
3.5	Autres possibilites techniques.....	10
4	EVALUATION ENVIRONNEMENTALE ET ECONOMIQUE.....	11
4.1	Terminologie	11
4.2	Evaluation quantitative des performances environnementales et des couts d'investissement.....	11
4.3	Evaluation qualitative des coûts d'exploitation	18
5	CONCLUSION.....	20

Résumé

Cette étude présente les résultats d'une enquête réalisée auprès de constructeurs européens de chaudières bois et de systèmes de dépoussiérage, d'exploitants et de maîtres d'ouvrage, portant sur l'évaluation technique, environnementale et économique des systèmes de dépoussiérage par filtre à manches ou électrofiltres pour des chaufferies de puissance inférieure à 4 MW. Si la mise en place de l'un ou l'autre des systèmes est techniquement faisable jusqu'à des puissances utiles d'environ 500 kW et permet d'aller bien au-delà des exigences réglementaires quand elles existent, le choix d'y recourir (ou non) résulte nécessairement d'un compromis entre les performances environnementales et les coûts. Cette étude montre d'une part que pour les chaudières de puissance utile comprise entre 1,2 et 3,2 MW, le surcoût d'investissement d'un filtre à manches ou d'un électrofiltre est évalué entre 20 et 30% du coût de référence ADEME d'une chaudière bois, pour un bénéfice environnemental réel. A l'inverse, pour les chaudières de puissance utile inférieure à 1,2 MW, ce surcoût peut atteindre jusqu'à 65% du coût de référence ADEME de chaudières bois, au regard d'un gain environnemental plus limité. D'autre part, le filtre à manches, moins encombrant que l'électrofiltre, peut atteindre de meilleurs niveaux de performance, ainsi qu'un montant d'investissement moins élevé pour un même niveau d'émission de poussières, mais présente un risque incendie sensiblement élevé contrairement à l'électrofiltre. Pour les chaudières de puissance inférieure à 1,2 MW, l'évaluation environnementale et économique avantage le filtre à manches par rapport à l'électrofiltre. Enfin, cette enquête n'a pas permis d'évaluer précisément les coûts d'exploitation.

1 INTRODUCTION

L'ADEME, dans le cadre du programme national bois énergie 2007-2010, souhaite assurer simultanément le développement de la filière bois énergie et la réduction des émissions polluantes, dont celles des poussières.

Le choix de la réduction des émissions de poussières issues du chauffage collectif et industriel est motivé par les raisons suivantes :

- les émissions de poussières ont en effet été identifiées dans l'étude des risques sanitaires appliquée au chauffage collectif au bois¹ comme une des contributions significatives au risque, même si au final les simulations aboutissent à des impacts toxiques et cancérogènes 2 à 1000 fois inférieurs aux seuils d'alerte, soit un impact qui peut être considéré négligeable ; la réduction des émissions de poussières doit permettre de diminuer encore ce risque ;
- il est également reconnu que la réduction des émissions de poussières permet aussi de réduire simultanément les émissions d'autres polluants (métaux lourds, dioxines, COV, HAP...) présents sous forme particulaire ;
- enfin, l'ADEME constate la convergence de nouvelles réglementations dans certains pays européens vers une réduction significative des émissions de poussières du secteur des chaufferies industrielles et collectives, comme le montre la figure ci-après.

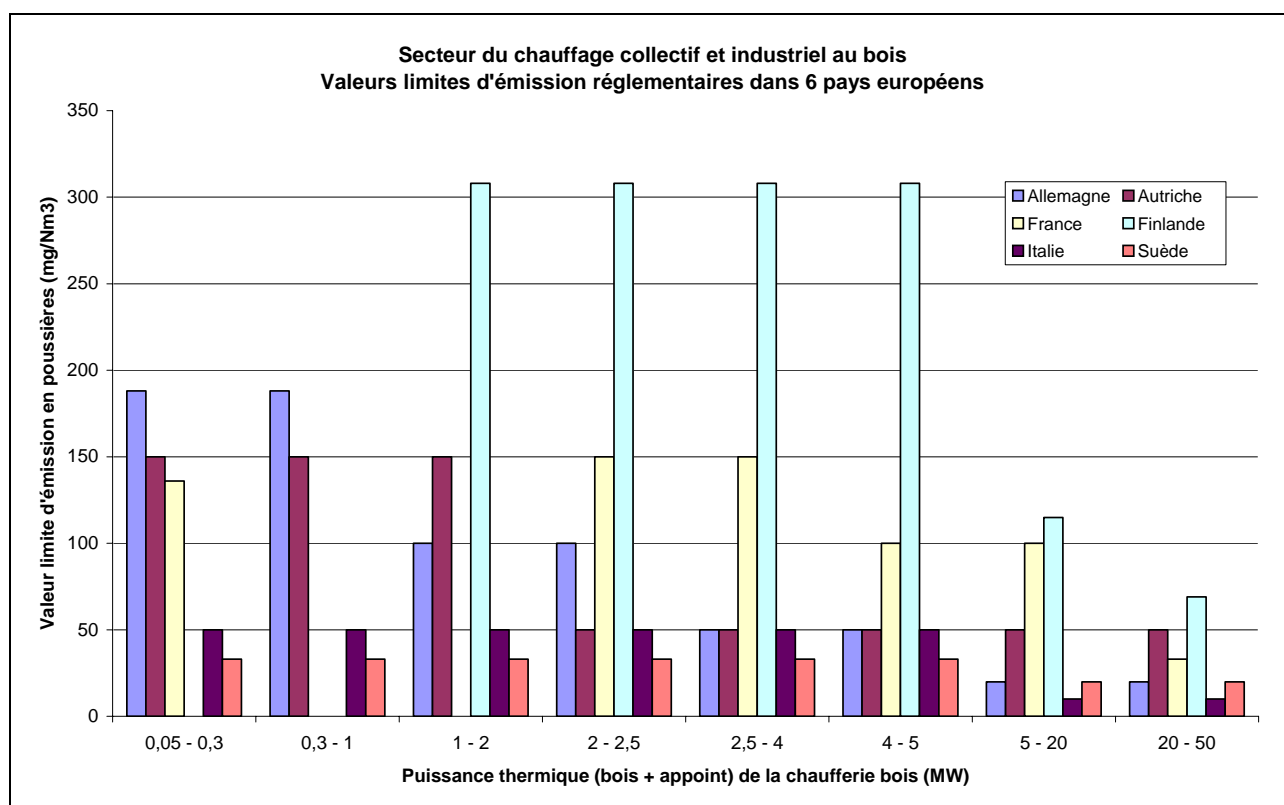


Figure 1. Valeurs limites d'émissions réglementaires de poussières en fonction de la puissance de la chaufferie dans 6 pays européens

¹ Source : ADEME / ANTEA, 2005, Evaluation des risques sanitaires d'une chaufferie de bois collective

Aujourd'hui en France, la réglementation impose aux chaufferies de puissance thermique (= puissance du bois + puissance du combustible d'appoint)² comprise entre 2 et 4 MW une valeur limite de rejet de poussières de 150 mg/Nm³ et pour les chaufferies de puissance thermique comprise entre 4 et 20 MW une valeur limite de rejet de poussières de 100 mg/Nm³ (arrêté modifié du 25 juillet 1997). Pour les chaufferies de puissance thermique inférieure à 2 MW, il n'existe pas de réglementation qui définisse de valeur limite de rejet et l'ADEME recommande de retenir la valeur limite réglementaire de rejet de poussières applicable aux chaufferies de puissance thermique comprise entre 2 et 4 MW, à savoir 150 mg/Nm³.

Le traitement des poussières par multicyclone est aujourd'hui une technique éprouvée et largement utilisée qui permet de respecter le seuil de 150 mg/Nm³ pour les chaudières de puissance thermique inférieure à 4 MW.

Les techniques de dépoussiérage par électrofiltre (EF) et filtres à manches (FAM) sont quant à elles des techniques éprouvées et largement utilisées pour des chaufferies de puissance thermique supérieure à 4 MW, pour lesquelles la réglementation fixe une valeur limite de rejet de poussières inférieure ou égale à 100 mg/Nm³ (arrêté modifié du 25 juillet 1997) qui ne peut pas être garantie par un multicyclone.

L'ADEME est régulièrement sollicitée pour donner un avis sur les performances et le coût des systèmes de dépoussiérage par électrofiltre et filtres à manches dans le cadre de chaufferies de puissance thermique inférieure à 4 MW, dont la réglementation n'impose pas de valeur limite de rejet de poussières inférieure ou égale à 150 mg/Nm³. Ces techniques permettent d'atteindre des valeurs d'émissions inférieures à 50 mg/Nm³, voire 10 mg/Nm³.

Pour répondre à ces sollicitations, l'ADEME a missionné la société TRIVALOR pour réaliser une évaluation technique, environnementale et économique des techniques disponibles de dépoussiérage pour les chaufferies industrielles et collectives de puissance thermique inférieure à 4 MW.

² La puissance thermique d'une chaufferie est définie comme la quantité d'énergie thermique contenue dans le combustible, exprimée en pouvoir calorifique inférieur, susceptible d'être consommée en une seconde en marche maximale continue. Elle est exprimée en mégawatt (MW).

2 METHODOLOGIE

La méthodologie utilisée pour réaliser cette étude repose sur l'interrogation (entretien téléphonique ou rencontres) de 10 constructeurs européens de chaudières bois sélectionnés conjointement par l'ADEME et TRIVALOR : Compte R (France), Energie 79 (France), Energie Système (France), Fröling (Autriche), Hargassner (France), KOB (France et Autriche), Nolting (Allemagne), Schmid (Suisse), Vincke (Belgique) et Weiss (Allemagne, France et Danemark). Sur cette sélection de 10 constructeurs, 7 ont été joignables par TRIVALOR dont 6 qui ont fourni des informations exploitables dans les délais impartis à l'étude.

Afin de compléter les résultats, TRIVALOR a contacté 5 fabricants de filtre (SIDAC, France ; Delta Neu, France ; FDC France ; BETH, Allemagne ; Tecfidis, France) dont trois ont pu répondre aux sollicitations dans les délais impartis.

TRIVALOR a également contacté plusieurs exploitants et maîtres d'ouvrages de chaufferie bois équipées de filtres à manches ou électrofiltres (Chabert et Duval, JH Industrie, Elyo et Dalkia), dans la gamme de puissance considérée, ou à peine supérieure, afin de recueillir plus d'éléments sur les coûts d'exploitation. Néanmoins, le retour d'expérience sur ce type d'équipement installé sur cette gamme de chaudière reste limité à l'heure actuelle en France.

Enfin, TRIVALOR a pris en compte des éléments en sa possession d'un projet d'installation de filtres à manches et d'électrofiltres sur une chaufferie bois en exploitation.

A partir des informations recueillies, un bilan qualitatif des performances des systèmes de dépoussiérage par filtre à manches et électrofiltres est présenté dans un premier temps, en mettant en évidence leurs avantages et inconvénients ; l'évaluation du surcoût lié à la mise en place de ces équipements est présenté dans un second temps, à partir des données économiques recueillies auprès des constructeurs.

3 EVALUATION QUALITATIVE DES PERFORMANCES DES SYSTEMES DE DEPOUSSIÉRAGE

Avant de présenter les avantages et inconvénients des filtres à manche et électrofiltres, il apparaît nécessaire de rappeler leur principe de fonctionnement.

3.1 MULTICYCLONE

3.1.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les fumées chargées en poussières sortent de la chaudière à environ 200 °C. Elles pénètrent alors dans le multicyclone. Les effluents gazeux entrent latéralement dans cette batterie de tubes à base conique (cyclones). Les gaz sont soumis à un mouvement de rotation. Les particules, sous l'effet de la force centrifuge, sont projetées sur la paroi des cyclones et tombent à la base du système. Collectées, les poussières sont stockées avant évacuation. Les fumées, après ce dépoussiérage, sont évacuées par la cheminée grâce au ventilateur de tirage qui met en dépression l'ensemble de la ligne de traitement.

3.1.2 PERFORMANCE

Les cyclones sont des appareils simples et fiables, bien qu'il existe des risques de colmatage et d'accumulation de particules.

Leur efficacité dépend pour une bonne part de la taille des particules présentes dans les fumées.

Leur rendement de captation est d'environ 98,5 % pour des particules de 20 microns mais tombe rapidement à 65 % pour des particules de 10 microns.

Or, les dimensions des poussières dépendent de la granulométrie du combustible utilisé. L'exploitant de la chaudière bois devra donc apporter une attention particulière aux performances garanties par le constructeur de l'équipement (avec multicyclones) dans le cas où le combustible majoritaire serait de la sciure de bois.

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

3.2 FILTRE A MANCHES

3.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les fumées chargées en poussières sortent de la chaudière à environ 200°C. Elles pénètrent alors dans le filtre à manches. Ce dernier est constitué de plusieurs cellules de filtration comprenant chacune des rangées de manches filtrants en feutre ou en tissu.

Les gaz sont tout d'abord dirigés vers les différentes cellules puis traversent les manches, de l'extérieur vers l'intérieur. Les poussières s'accumulent en gâteau sur le média filtrant.

La collecte des gâteaux de filtration est effectuée régulièrement par soufflage d'air comprimé à l'intérieur des manches. Les poussières sont collectées dans une ou plusieurs trémies en partie basse des caissons.

Après dépoussiérage, les fumées sont évacuées par la cheminée.

3.2.2 PERFORMANCE

Les « gâteaux » formés sur les manches possèdent un pouvoir filtrant lié à leur porosité qui s'ajoute à celui des manches eux-mêmes. Il en résulte la capacité des filtres à manches à fixer les particules très fines. De plus, contrairement à l'électrofiltre, le rendement de filtration ne change pas avec la concentration de poussière.

Les seuils de performance garantis peuvent être de 10, 30 ou 50 mg/Nm³. Ces seuils de performance varient en fonction de la nature du combustible, de la demande du Maître d'Ouvrage ainsi que des moyens financiers disponibles. La performance attendue de l'équipement aura une incidence sur les coûts des équipements, variables selon la taille des équipements, le nombre de manches et la technologie choisie pour un filtre à manches.

3.3 ELECTROFILTRÉS

3.3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Les fumées chargées en poussières sortent de la chaudière à environ 200° C. Elles pénètrent alors dans l'électrofiltre. Ce dernier est constitué de plaques métalliques verticales de grande dimension entre lesquelles circulent les fumées. Un groupe électrique établit une différence de potentiel entre des électrodes émissives filiformes, chargées positivement, et ces plaques qui deviennent des électrodes réceptrices. Les particules de poussières sont chargées par les ions produits par les électrodes émissives et attirées par les plaques (électrode réceptrice) où elles viennent s'accumuler. Des marteaux frappent régulièrement les plaques pour décoller les poussières qui tombent dans des trémies à la base du caisson de l'électrofiltre. Les effluents gazeux débarrassés des poussières sont évacués par la cheminée via le ventilateur de tirage qui met en dépression la ligne de traitement.

3.3.2 PERFORMANCE

Contrairement au multicyclone, l'électrofiltre garde de bonnes performances pour les particules de petite taille. Le rendement de captation est de 95 % pour des particules de 0,1 microns (à comparer avec les 65 % pour 10 microns du multicyclone).

En théorie, chaque champ d'électrofiltre a un rendement de captation de l'ordre de 90 %. Cependant, ce rendement diminue si la concentration des poussières augmente.

Les seuils de performance garantis peuvent être de 30, 50 ou 100 mg/Nm³. Là encore, les seuils de performance varient en fonction de la nature du combustible (contrairement à un filtre à manches, l'électrofiltre ne permet pas de garantir un seuil de rejet quelque soit la biomasse entrante, le combustible doit être du bois uniquement), de la demande du Maître d'Ouvrage ainsi que des moyens financiers disponibles. La performance attendue de l'équipement aura une incidence sur les coûts des équipements, variables avec la taille des équipements.

3.4 BILAN AVANTAGES / INCONVENIENTS

Le tableau 1 ci-après présente les avantages et inconvénients des filtres à manches et électrofiltres, faisant l'objet d'un consensus par les différents constructeurs interrogés lors de l'étude.

Tableau 1. Avantages et inconvénients des filtres à manches et électrofiltres

Système de dépolluage	Avantages	Inconvénients
Filtre à manches	<ul style="list-style-type: none"> - Performance garantie plus élevée (10 mg/Nm³) - Seuil de rejet garanti quelque soit le combustible biomasse - Seuil de rejet constant en sortie - Anticipation possible de contraintes réglementaires plus fortes en termes de seuil de rejet - Coûts d'investissement moins élevés à débit d'air identique et seuil de rejets identiques - Le coût d'investissement dépend du nombre de manches, donc plus adaptable en fonction de la puissance de la chaudière. 	<ul style="list-style-type: none"> - Changement des manches peut nécessiter jusqu'à 2 jours d'intervention, nécessite personnel qualifié - Nécessite de la place pour le changement des manches - Risque incendie, nécessité d'un système de détection et d'extinction incendie - Pertes de charges plus importantes - Sensible aux polluants acides (surtout problématique pour le charbon) - Nuisances acoustiques - Coût d'exploitation plus élevé (durée de vie de manches d'environ 3 ans)

Electrofiltre	<ul style="list-style-type: none"> - Risque incendie beaucoup plus faible - Seuil de rejet pouvant descendre jusqu'à 30 mg/Nm³ - Pertes de charges moins importantes, donc consommations électriques associées moins élevées) - Coût d'exploitation inférieur 	<ul style="list-style-type: none"> - Encombrement : nécessite vitesse d'écoulement des gaz plus faible, donc volume plus élevé - Induit coût génie civil plus élevé, lorsque le filtre est placé à l'intérieur - Coût d'investissement minimal incompressible quelque soit la puissance de la chaudière (coût identique pour une chaudière de 500 kW ou 1 MW). - Nécessite habilitation électrique pour entretien - Nuisances acoustiques
----------------------	--	--

3.5 AUTRES POSSIBILITES TECHNIQUES

Certains avis techniques convergent vers la mise en place d'un échangeur en sortie de chaudière, permettant de récupérer la chaleur des gaz de fumées, ce qui permet d'améliorer le rendement de la chaudière, de diminuer le volume d'air à traiter en sortie et de s'affranchir du coût d'un électrofiltre. Le coût de cet équipement serait d'1/3 du coût de l'électrofiltre pour les chaudières de puissance inférieure à 1 MW, et permettrait de réduire de 50 % les émissions de poussières.

L'amélioration des conditions de combustion est également une autre piste pour limiter les quantités de poussières émises. Par exemple, un brevet a été déposé par un fabricant de chaudière pour un système d'introduction d'air secondaire permettant une circulation particulière de l'air dans la chambre de combustion.

Le réglage de la chaudière, l'adéquation combustible/technologie de chaudières sont également des aspects permettant de limiter les rejets (le taux de cendres sur copeaux, sciure sèche, granulés est inférieure à 1 %, pour les sciures humides et plaquettes forestières, il est compris entre 1 et 2 %, alors qu'il dépasse les 5 % pour l'écorce).

4 EVALUATION ENVIRONNEMENTALE ET ECONOMIQUE

4.1 TERMINOLOGIE

Les différentes informations économiques recueillies auprès de fabricants de chaudières bois puis analysées sont établies en fonction de la puissance utile de la chaudière bois, et non de la puissance totale de l'installation (chaudière bois et appoint) qui est utilisée dans la réglementation.

La puissance utile de la chaudière bois est égale à la puissance thermique du combustible bois multiplié par le rendement thermique de la chaudière. Par exemple, une chaudière de puissance bois de 1 MW et d'un rendement thermique de 80% aura une puissance utile de 0,8 MW.

Pour mémoire, rappelons les définitions réglementaires de la puissance thermique, selon l'arrêté du 25 juillet 97, art 1.9 :

- puissance thermique d'un appareil : la puissance d'un appareil de combustion est définie comme la quantité d'énergie thermique contenue dans le combustible, exprimée en pouvoir calorifique inférieur, susceptible d'être consommée en une seconde en marche maximale continue. Elle est exprimée en mégawatt (MW),
- puissance thermique de l'installation : la puissance de l'installation est égale à la somme des puissances de tous les appareils de combustion qui composent cette installation. Elle est exprimée en mégawatt (MW). Lorsque plusieurs appareils composant une installation sont dans l'impossibilité technique de fonctionner simultanément, la puissance de l'installation est la valeur maximale parmi les sommes des puissances des appareils pouvant fonctionner simultanément. Cette règle s'applique également aux appareils de secours venant en remplacement d'un ou plusieurs appareils indisponibles dans la mesure où, lorsqu'ils sont en service, la puissance mise en œuvre ne dépasse pas la puissance totale déclarée de l'installation.

4.2 EVALUATION QUANTITATIVE DES PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES ET DES COUTS D'INVESTISSEMENT

4.2.1 HYPOTHESES

Les coûts ont été fournis par les fabricants de chaudières bois, sur la base de devis auprès de constructeurs de filtres ou de leur retour d'expériences, pour différentes puissances de chaudière, pour des seuils de rejet fixés par les fabricants de chaudières.

Les coûts indiqués comprennent l'installation par le chaudiériste, ainsi que les systèmes de régulation et automatisme.

Ils ne comprennent ni le surcoût éventuel lié à la déportation du système d'évacuation des suies (pouvant être nécessaire en fonction de la hauteur sous filtre)³, ni les surcoûts de génie civil.

Les seuils de rejet sont indiqués pour un taux d'oxygène de 11 % sur air sec.

Selon la majorité des avis recueillis, la mise en place d'un filtre à manches implique également la mise en œuvre d'un système de détection et d'extinction incendie. Par hypothèse, un coût minimal de 10 000 € HT a été pris en compte.

Selon certains avis, l'installation d'un multicyclone ne serait pas absolument nécessaire en amont d'un électrofiltre. Néanmoins, la majorité des fabricants (chaudières ou filtres) préconisent l'installation de multicyclones en amont du filtre à manches ou de l'électrofiltre : celui-ci, pour un montant d'investissement réduit, permet de réaliser 90 % de la filtration en amont. De plus, le multicyclone permet la filtration des plus grosses particules qui sont le plus susceptibles d'être incandescentes. Aussi, nous avons pris cette hypothèse pour l'évaluation économique ci-après.

³ surcoût estimé à environ 10 000 EUR HT

Sur la base des informations fournies, les performances environnementales des systèmes de dépoussiérage ont été fixées à :

- 150 mg/Nm³ de poussières pour les multicyclones (scénario de référence),
- 20 ou 30 mg/Nm³ de poussières pour les filtres à manches,
- 50 mg/Nm³ de poussières pour les électrofiltres.

Pour l'exploitation des données, les hypothèses sont les suivantes :

- Un amortissement de l'investissement par un emprunt à 3,5 % d'intérêt sur une durée de 20 ans,
- Un fonctionnement annuel de la chaufferie pendant 2500 heures,
- Les débits d'air indiqués par le constructeur ou calculés ont été utilisés,
- Un prix du combustible bois de 20 EUR HT/MWh (fourchette basse du marché),
- Un rendement chaudière de 0,8.

4.2.2 RESULTATS BRUTS

Les coûts d'investissement des différents systèmes de dépoussiérage (multicyclone, filtres à manches et électrofiltres) sont présentés dans le tableau 2 et la figure 2 pour différentes puissances utiles de chaudière bois et pour différentes performances environnementales (exprimées en mg/Nm³ de poussières).

Tableau 2. Coûts d'investissement du système de dépoussiérage (hors système d'extinction et détection incendie) selon la puissance utile de la chaudière

	Puissance utile chaudière	Multicyclone			Filtre à manche			Electrofiltre		
		Seuil de performance attendu (mg/Nm ³ de poussières)	Investissement total en € HT	Source	Investissement total en € HT	Seuil de performance attendu (mg/Nm ³ de poussières)	Source	Investissement total en € HT	Seuil de performance attendu (mg/Nm ³ de poussières)	Source
Cas n°1	500 kW	150	5000	Estimation	90 000	20	Devis	115000	50	Devis
Cas n°2	1000 kW	150	8000	Estimation	110000	20	Devis	115000	50	Devis
Cas n°3	1200 kW	150			96000	30	Estimation	70000	50	Estimation
Cas n°4	1700 kW	50	15000	Estimation				70000		Installation
Cas n°5	2000 kW	150	11000	Estimation	120000	20	Devis	130000	50	Devis
Cas n°6	3000 kW	150	15000	Estimation	140000	20	Devis	140000	50	Devis
Cas n°7	3200 kW	150			180000	30	Estimation	140000	50	Estimation

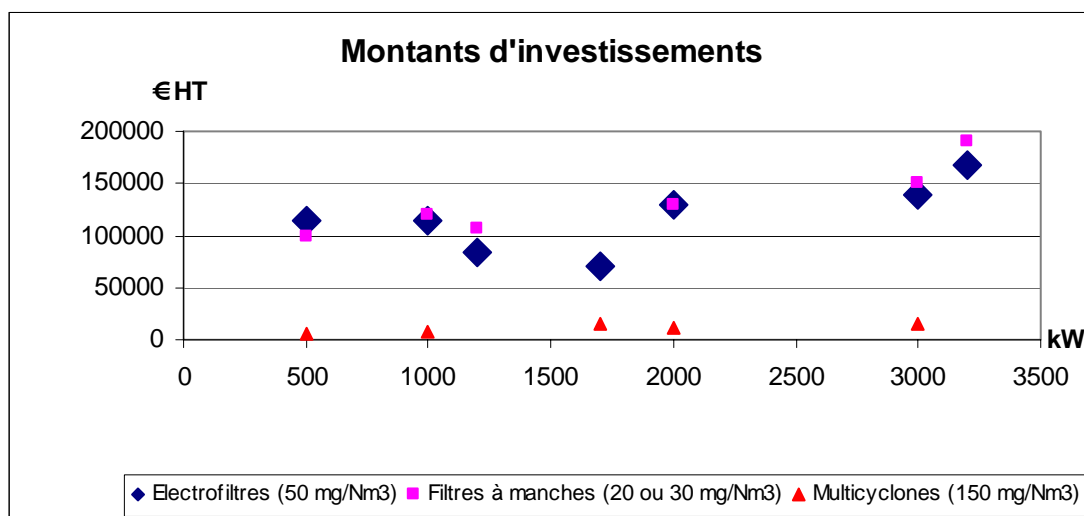


Figure 2. Coûts d'investissement du système de dépoussiérage (système d'extinction et détection incendie inclus) selon la puissance utile de la chaudière

Les montants d'investissement des multicyclones restent négligeables par rapport aux électrofiltres ou filtres à manches, et compte tenu de leur pouvoir de filtration, peuvent justifier de les conserver en sortie de chaudière.

Dans la gamme 1MW à 3,2 MW, on constate que le coût d'investissement d'un filtre à manches et celui d'un électrofiltre sont du même ordre de grandeur, pour des performances de traitement de poussières différentes : 20 ou 30 mg/Nm³ pour le filtre à manche et 50 mg/Nm³ pour un électrofiltre. En d'autres termes, pour un même niveau de performance environnementale, le coût d'investissement d'un filtre à manche est inférieur à celui d'un électrofiltre.

Très peu d'éléments ont été fournis pour les chaudières de puissance inférieure à 1 MW, ce qui ne permet pas de quantifier un écart éventuel du coût d'investissement d'un système par rapport à un autre ; néanmoins, compte tenu d'une part des commentaires apportés par des fabricants de filtres et d'autre part du même niveau de prix pour un EF (électrofiltre) et un FAM (filtre à manches) indiqués dans les devis pour des chaudières de 500 kW et 1 MW, on peut supposer qu'en dessous de 1 MW, le prix d'un EF devient plus contraignant pour la réalisation d'une chaufferie bois, que la mise en place d'un FAM, qui nécessitera moins de manches pour des puissances plus faibles. La mise en place d'un électrofiltre reste coûteuse pour une petite installation (< 1 MW).

Les prix de filtres indiqués par les fabricants de chaudières sont des filtres exclusivement proposés par des fabricants étrangers. Les fabricants français de filtres interrogés ne se sont pas prononcés en termes de budget sur cette gamme de puissance de chaudière bois.

Ces prix sont valables pour des installations neuves. Un coefficient minimal d'environ 1,5 serait à appliquer pour des installations existantes.

Les prix des électrofiltres subissent des variations importantes, le coût aurait subi une augmentation de 15 % en 1 an et demi.

Enfin, certains fabricants de chaudières et de filtres indiquent la création récente d'électrofiltres et de filtres à manches de petites tailles, spécifiques pour les petites puissances, qui sont encore à l'essai à ce jour et qui n'ont donc pas été intégrés à l'étude.

4.2.3 EXPLOITATION DES DONNEES

Les données recueillies auprès des fabricants de chaudières diffèrent selon la puissance de la chaudière bois et selon le seuil de rejet associé au système de dépoussiérage (150 mg/Nm³ pour le MC, 50 pour l'EF et 20 ou 30 pour le FAM). Afin de comparer les performances et les coûts des différents systèmes de dépoussiérage, les ratios suivants ont été établis :

- Gain environnemental annuel, en t/an de poussières évitées⁴ ;
- Surcoût d'investissement par unité de poussières évitées, en EUR HT/t de poussières évitées⁵ ;
- Surcoût d'investissement par unité de puissance bois utile, en EUR HT/kW⁶ ;
- Surcoûts d'investissement du système de dépoussiérage comparés à un coût de référence ADEME d'investissement global de la chaudière bois ;
- Surcoût d'investissement par unité de bois consommé, en EUR HT/MWh⁷ ;
- Surcoût d'investissement comparé au prix du combustible bois en entrée chaufferie.

Ces surcoûts sont évalués par rapport à une situation de référence, qui correspond à un système de dépoussiérage par multicyclone, dont le seuil de rejet est de 150 mg/Nm³. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.

⁴ Gain environnemental (t/an) = (Seuil de performance EF ou FAM – Seuil de performance MC) (mg/Nm³) * Débit (Nm³/h) * durée annuelle de fonctionnement (h) / 10⁹

⁵ Surcoût d'investissement / t de poussières évitées = Annuité de l'amortissement de l'investissement (EUR HT/an) / Gain environnemental (t/an)

⁶ Ce ratio est obtenu en divisant le coût d'investissement du système de dépoussiérage (EF ou FAM) par la puissance utile de la chaudière. Rappelons qu'il ne s'agit pas d'un surcoût par rapport au multicyclone, puisque celui-ci est intégré en base.

⁷ Surcoût d'investissement / bois consommé (EUR HT/MWh) = Annuités (EUR HT/an) * (P (MW) * durée de fonctionnement (h) / 0,8)

Tableau 3. Evaluation environnementale et économique de la mise en place d'un système de dépoussiérage performant selon la puissance utile de la chaudière

		Scénario de référence (traitement par multicyclone)		Scénario avec système de dépoussiérage plus performant (émissions ≤ 50 mg/Nm³)														
				Filtre à manche						Electrofiltre								
	Puissance utile chaudière			Seuil de performance attendu (mg/Nm³ de poussières)	Investissement total en € HT	Investissement total en € HT	Annuités en € HT	Gain environnemental en T de poussières évitées	Ratio en € HT/T de poussières évitées	Ratio en € HT/kW utile	Ratio en € HT/MWh de bois consommé	Seuil de performance attendu (mg/Nm³ de poussières)	Investissement total en € HT	Annuités en € HT	Gain environnemental en T de poussières évitées	Ratio en € HT/T de poussières évitées	Ratio en € HT/kW utile	Ratio en € HT/MWh bois consommé
Cas n°1	500 kW	150	5 000 €	100 000	7 036 €	0,43	16 278 €	14,07 €	4,50 €	20		115000	8 092 €	0,33	24 335 €	16,18 €	5,18 €	50
Cas n°2	1000 kW	150	8 000 €	120000	8 443 €	0,86	9 767 €	8,44 €	2,70 €	20		115000	8 092 €	0,67	12 168 €	8,09 €	2,59 €	50
Cas n°3	1200 kW	150		116000	8 162 €	0,98	8 371 €	6,80 €	2,18 €	30		84000	5 910 €	0,81	7 274 €	4,93 €	1,58 €	50
Cas n°5	2000 kW	150	11 000 €	130000	9 147 €	1,73	5 290 €	4,57 €	1,46 €	20		130000	9 147 €	1,33	6 877 €	4,57 €	1,46 €	50
Cas n°6	3000 kW	150	15 000 €	141000	9 921 €	2,59	3 825 €	3,31 €	1,06 €	20		140000	9 851 €	2,00	4 938 €	3,28 €	1,05 €	50
Cas n° 7	3200 kW	150		190000	13 369 €	2,60	5 140 €	4,18 €	1,34 €	30		168000	11 821 €	2,17	5 454 €	3,69 €	1,18 €	50

❖ **Gain environnemental**

Le gain environnemental est évalué pour chaque puissance de chaudière équipée d'un filtre à manches ou d'un électrofiltre. Par convention, l'hypothèse de la présence d'un multicyclone en amont a été retenue. La concentration des fumées en poussières, en sortie du multicyclone, prise pour hypothèse est de 150 mg/Nm³ (valeur réglementaire seuil pour les installations de puissance comprise entre 2 et 4 MW).

Le gain environnemental d'un dépoussiérage par filtre à manches varie de 0,43 à 2,60 t de poussières évitées par an pour des chaudières bois de puissance respectivement égale à 500 et 3 200 kW.

Le gain environnemental d'un dépoussiérage par électrofiltre est plus faible et varie de 0,33 à 2,17 t de poussières évitées par an pour des chaudières bois de puissance respectivement égale à 500 et 3 200 kW.

La différence de gain environnemental entre les deux systèmes de dépoussiérage s'explique par des hypothèses de seuils de performance attendues différentes : la valeur limite d'émission de poussières est égale à 20 ou 30 mg/Nm³ de fumées pour le filtre à manches et 50 mg/Nm³ pour l'électrofiltre.

❖ **Surcoût d'investissement par unité de poussière évitée**

La figure 3 présente le surcoût d'investissement par tonne de poussières évitées.

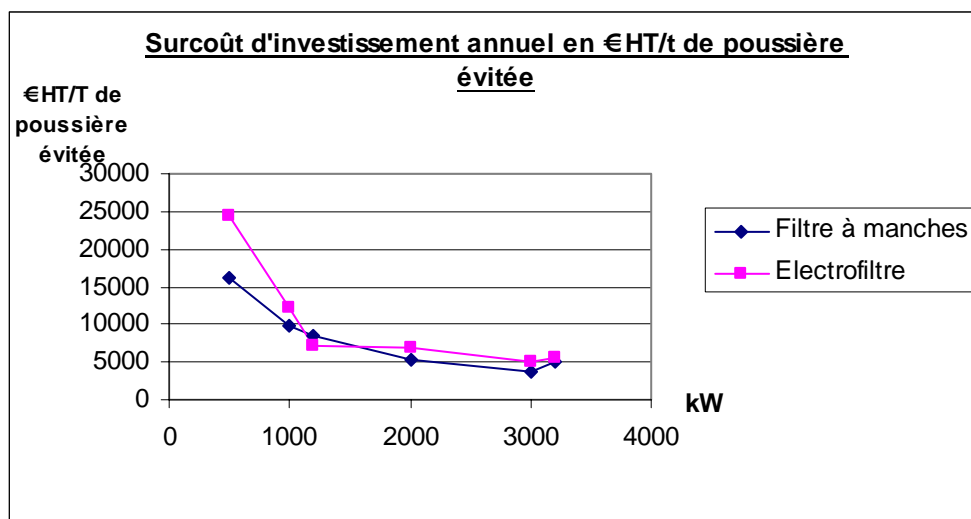


Figure 3. Surcoût d'investissement en EUR HT/t de poussières évitées, selon la puissance utile de la chaudière bois

Pour la gamme de puissance comprise entre 1 et 4 MW, le surcoût d'investissement par unité de poussières évitées est comparable entre les deux systèmes de dépoussiérage, voire légèrement moins cher dans le cas du filtre à manches. Ce résultat est conforté par les commentaires d'une majorité de personnes interrogées au cours de l'étude.

Ensuite, malgré le manque de données sur les chaudières de puissance utile inférieure à 500 kW, on observe une nette inflexion des surcoûts d'investissement par unité de poussières évitées autour de 1,2 MW, quelque soit le système de dépoussiérage. Dans le cas de l'électrofiltre, ce ratio est multiplié par un facteur 2 en passant d'une puissance comprise entre 1,2 et 3 MW à une puissance de 1 MW et un autre facteur 2 en passant d'une puissance 1 MW à 0,5 MW. On observe également que l'écart se creuse entre les deux systèmes de filtration, à l'avantage du filtre à manches, pour les chaudières de puissance inférieure à 1 MW.

❖ *Surcoût d'investissement par unité de puissance utile bois*

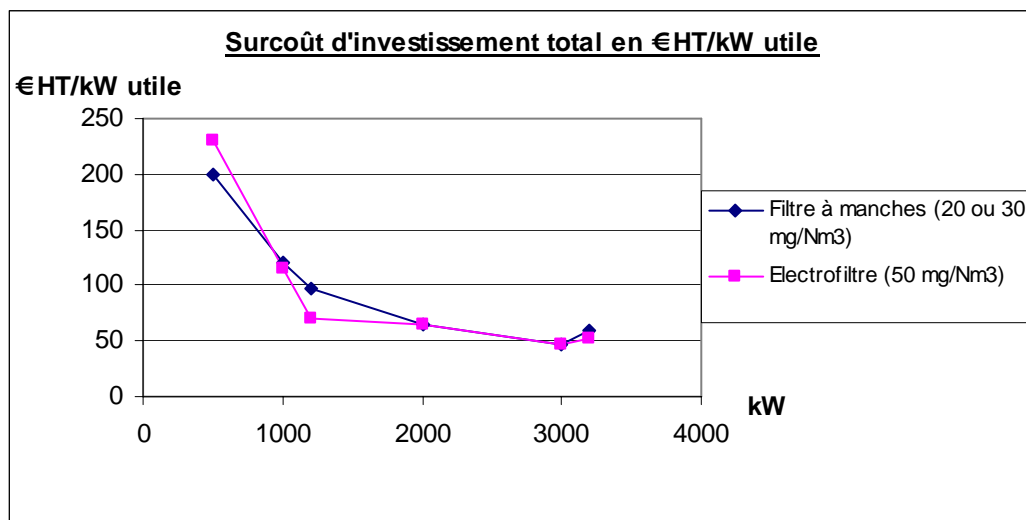


Figure 4. Surcoût d'investissement par unité de puissance utile, selon la puissance utile de la chaudière bois (en €/HT/kW utile)

Le surcoût d'investissement par unité de puissance utile est inférieure à 100 € HT / kW utile pour les chaudières bois de puissance utile supérieure à 1,2 MW. Il est de l'ordre de 50 € HT / kW utile pour les chaudière de puissance utile d'environ 3 MW.

La figure 4 ci-dessus met également en évidence l'inflexion à partir du seuil de 1,2 MW. Un coût minimal incompressible est à prendre en compte quelque soit la puissance de la chaudière : cela est particulièrement important pour l'électrofiltre, qui de fait apparaît moins intéressant d'un point de vue montant d'investissement pour les petites puissances.

❖ *Surcoût d'investissement du système de dépoussiérage comparé au coût d'investissement global de la chaudière bois*

Le surcoût d'investissement du système de dépoussiérage par filtre à manches ou électrofiltre peut être comparé, pour différentes puissances, au coût d'investissement global de la chaudière bois avec seulement un multicyclone. Le coût d'investissement global est estimé par l'ADEME hors maîtrise d'œuvre, hors génie civil et hors réseau de chaleur et sur la base d'un dépoussiérage par multicyclone uniquement.

Tableau 4 : Montants d'investissement de référence ADEME pour les chaufferies bois et surcoûts d'investissements correspondants de filtres à manches et électrofiltres.

Puissance utile bois (kW)	Equipements chaudière bois et fluides	Surcoûts FAM	Surcoûts EF	% surcoûts FAM	% surcoûts EF
480	178626	100000	115000	56,0	64,4
1000	310885	120000	115000	38,6	37,0
1200	334448	116000	84000	34,7	25,1
2000	408939	130000	130000	31,8	31,8
3000	744147	141000	140000	18,9	18,8

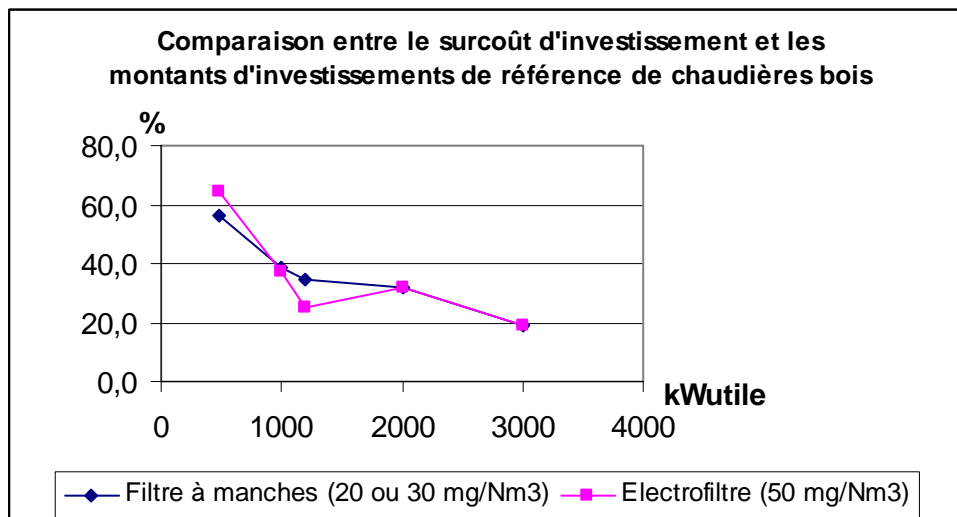


Figure 5. Surcoût d'investissement global et différents montants de référence ADEME de chaudières bois (hors réseau de chaleur, génie civil et maîtrise d'œuvre).

Comme le montre la figure 5, le surcoût d'investissement du système de dépoussiérage représente 20 à 30% du coût d'investissement global de la chaufferie, pour des puissances utiles comprises entre 1,2 et 3MW.

Pour les puissances inférieures à 1,2 MW en revanche, le surcoût représente plus de 20% et peut atteindre 65% dans le cas d'un électrofiltre installé sur une chaufferie de 500 kW bois.

❖ **Surcoût d'investissement par unité de bois consommé.**

Le surcoût d'investissement par unité de bois consommé est inférieure à 2 € HT / MWh bois pour les chaudières bois de puissance utile supérieure à 1,2 MW. Il est de l'ordre de 1 € HT / MWh bois pour les chaudière de puissance utile d'environ 3 MW.

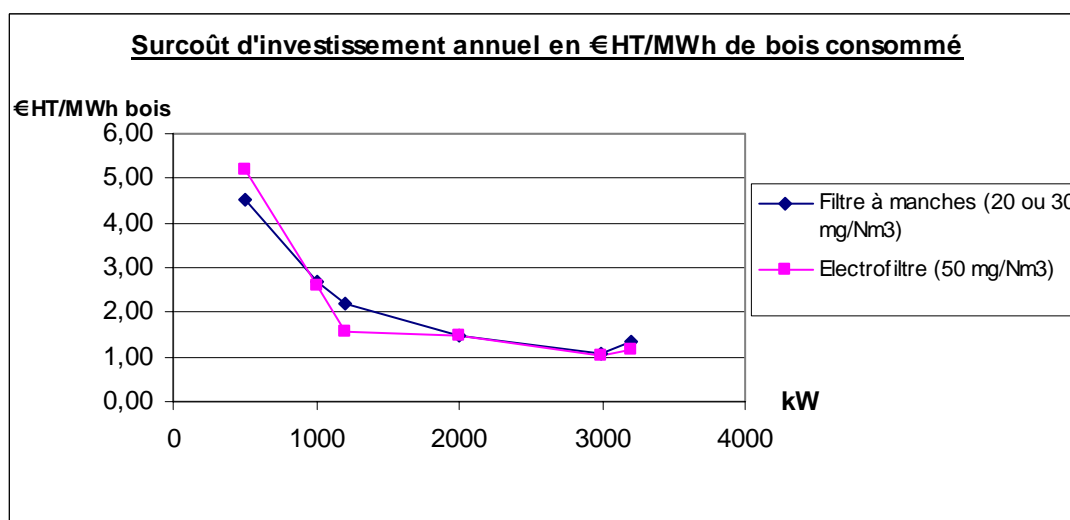


Figure 6. Surcoût d'investissement par unité de bois consommé (en EUR HT/MWh) selon la puissance utile de la chaudière bois

De même que précédemment, cet indicateur met en évidence une inflexion significative à partir du seuil de 1,2 MW, avec des surcoûts d'investissement par unité de bois consommé d'environ 5 € HT / MWh bois pour les chaudières bois de puissance utile de 500 kW.

❖ **Surcoût d'investissement comparé au prix du combustible bois en entrée chaufferie**

Comme le montre la figure 7, le surcoût d'investissement lié à la mise en place d'un filtre à manches ou d'un électrofiltre représente moins de 10% du prix du combustible bois pour les chaufferies de puissance supérieure à 1,2 MW (rappel : prix du combustible entrée chaufferie égal à 20 EUR HT/MWh). Il représente 5% pour les chaufferies d'environ 3 MW. En revanche, pour les chaufferies de puissance inférieure à 1,2 MW, ce surcoût d'investissement est significatif comparé au prix du combustible bois entrée chaufferie, et peut atteindre 25% pour une chaufferie de 500 kW.

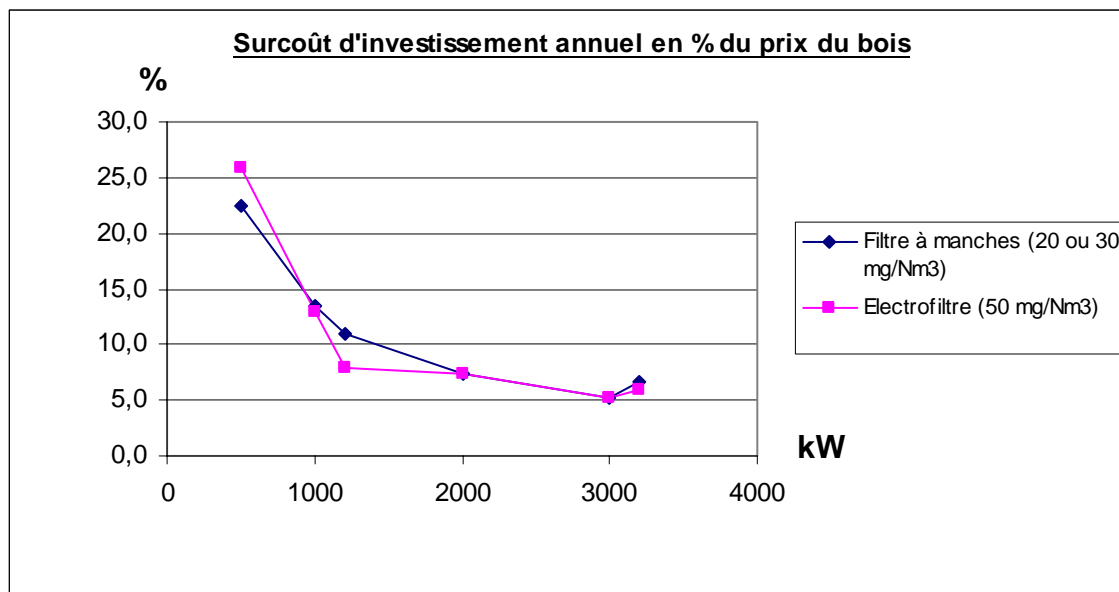


Figure 7. Comparatif entre le surcoût d'investissement annuel et le prix du bois, selon la puissance utile de la chaudière bois

4.3 EVALUATION QUALITATIVE DES COÛTS D'EXPLOITATION

Très peu de données ont pu être recueillies sur les coûts d'exploitation de systèmes de filtration sur cette gamme de puissance de chaudières, compte tenu d'une part du faible retour d'expérience disponible (nombre limité d'installations, et en fonctionnement depuis peu de temps), et d'autre part, compte tenu du fait que les coûts d'exploitation sont généralement intégrés dans l'ensemble des coûts d'exploitation de la chaufferie.

Cette partie présente le retour d'expérience disponible sur la base d'un bilan qualitatif des différents postes de consommation, à savoir : P'1 (consommations électriques), P2 (entretien et maintenance) et P3 (provision pour gros renouvellement).

4.3.1 CONSOMMATIONS ELECTRIQUES (P'1)

Les consommations électriques sont d'une part liées aux pertes de charges, plus importantes sur un filtre à manches que sur un électrofiltre et d'autre part aux besoins mêmes des équipements. Les postes de dépenses les plus importants sont :

- Pour l'électrofiltre, le générateur haute tension et le ventilateur ;
- Pour le filtre à manches, le compresseur et le ventilateur.

4.3.2 ENTRETIEN ET MAINTENANCE (P2)

D'après les entretiens obtenus, les principaux éléments à prendre en compte sont les suivants :

Filtre à manches	Electrofiltre
Entretien du compresseur	
Mise en décharge des poussières	Mise en décharge des poussières
Visite annuelle constructeur	Visite annuelle constructeur
Nettoyage annuel	Nettoyage annuel
Vidange huiles	Vidange huiles

4.3.3 PROVISIONS POUR GROS RENOUVELLEMENT (P3)

Filtre à manches	Electrofiltre
Remplacement des manches (durée de vie garantie environ 3 ans, selon combustible en entrée et niveau de filtration demandé).	Remplacement des isolateurs
	Remplacement des résistances de chauffage
Remplacement vis sans fin pour évacuation des suies.	Remplacement vis sans fin pour évacuation des suies.

Plusieurs éléments importants ressortent des divers entretiens, à savoir :

- Le plus gros poste d'exploitation pour les filtres à manches relèvent du changement des manches. Ce coût est difficile à exploiter car variable en fonction du nombre de manches (donc du niveau de filtration demandé, de la taille de la chaudière), et du type de manches (donc du combustible en entrée, de la température des gaz en sortie de chaudière). Le coût de manches peut varier d'un facteur 1 à 6. En l'absence de données constructeurs ou exploitants plus précis basés sur des cas concrets, il n'est pas envisageable d'estimer des ratios liés au surcoût d'exploitation de tel ou tel type de filtres.
- Une partie des postes d'exploitation varient sensiblement avec la taille des équipements pour les filtres à manches (consommations électriques, changement des manches) de manière plus importante que pour un électrofiltre ; aussi, il est raisonnable de considérer que l'inflexion observée au seuil de 1MW concernant les coûts d'investissement peut être confirmée par les coûts d'exploitation, en faveur du filtre à manches.

5 CONCLUSION

Les divers entretiens réalisés auprès de fabricants européens de chaudières et complétés par des contacts auprès de fabricants de filtres, exploitants et Maîtres d'Ouvrages de chaufferies bois ont permis d'évaluer techniquement, environnementalement et économiquement les systèmes de dépoussiérage par filtre à manches et électrofiltre pour des chaufferies de puissance bois inférieure à 4 MW et plus spécifiquement des puissances utiles comprises entre 500 kW à 3,2 MW (la différence entre la puissance bois et la puissance utile est le rendement énergétique de la chaudière, généralement évaluée à 80%).

Cette étude met d'abord en évidence les avantages et inconvénients de ces systèmes de filtration de poussières. **Le filtre à manches peut atteindre de meilleurs niveaux de performance, ainsi qu'un montant d'investissement moins élevé pour un même niveau d'émission de poussières. L'électrofiltre est plus encombrant, mais ne présente pas les mêmes risques incendie que le filtre à manches.**

Quelque soit la puissance de la chaudière, la mise en place de l'un ou l'autre des systèmes est techniquement faisable, jusqu'à des puissances utiles d'environ 500 kW.

Le choix de recourir (ou non) à un système de dépoussiérage par filtre à manches ou par électrofiltre, ce qui permet d'aller bien au-delà des exigences réglementaires, résulte nécessairement d'un compromis entre les performances environnementales et les coûts.

Cette étude montre que l'investissement d'un filtre à manches ou d'un électrofiltre, par rapport au coût global de référence ADEME d'une chaudière bois, est moins couteux pour les chaudières de puissance utile comprise entre 1,2 et 3,2 MW que pour les chaudières de puissance utile inférieure à 1,2 MW, et permet également des gains environnementaux plus importants.

Sur la base des informations transmises par les constructeurs de chaudières, la mise en place d'un filtre à manches ou d'un électrofiltre nécessite un investissement allant de 100 000 € HT pour les chaudières de puissance inférieure à 1,2 MW à près de 200 000 € HT pour une chaudière de 3 MW.

L'évaluation économique montre un seuil de puissance utile de 1,2 MW environ (soit une puissance bois de 1,5 MW) en dessous duquel on observe une nette inflexion de différents indicateurs économiques. **Pour une chaufferie de puissance utile comprise entre 1,2 et 3,2 MW (puissance bois entre 1,5 et 4 MW), le surcoût d'investissement lié à la mise en place d'un système de dépoussiérage par filtre à manches ou électrofiltre représente 20 à 30% du coût de référence ADEME d'investissement global d'une chaudière bois équipée seulement d'un dépoussiérage par multicyclone.** En dessous de 1,2 MW utile, il augmente rapidement et peut atteindre 65% du coût d'investissement de la chaudière pour une puissance utile de 500 kW. Les informations disponibles pour cette gamme de puissance sont malheureusement peu nombreuses.

La mise en place d'un système de dépoussiérage par filtres à manches ou électrofiltre permet **d'éviter l'émission d'importantes quantités de poussières dans l'atmosphère** : environ 400 kg/an de poussières en moins pour les chaudières de puissance égale à 500 kW et **2 600 kg/an de poussières en moins pour les chaudières de 3 MW équipées d'un filtre à manches.**

Le coût du kg de poussières évitées varie quant à lui entre 5 et 10 € HT pour les chaudières de puissance supérieure à 1,2 MW, alors qu'il atteint 15 à 25 € HT pour les chaudières de puissance inférieure à 1,2 MW.

Comparé au prix du bois, l'investissement dans un système de dépoussiérage de type filtre à manches ou électrofiltre représente 1 à 2 € HT / MWh de bois consommé pour les chaudières de puissance supérieure à 1,2 MW. En d'autres termes, sur la base d'une hypothèse de prix de combustible bois égal à 20 € HT / MWh, **l'investissement dans un système de dépoussiérage de type filtre à manches ou électrofiltre représente 5 à 10% du prix du combustible bois pour les chaudières de puissance supérieure à 1,2 MW.** Ce pourcentage atteint 25% pour les chaudières de puissance inférieure à 1,2 MW.

Pour les puissances inférieures à 1 à 1,2 MW, le prix d'un électrofiltre serait du même ordre de grandeur pour une puissance de 500 kW ou de 1 MW et généralement supérieur au prix d'un filtre à manches qui a de meilleures performances environnementales. **Pour les chaudières de puissance inférieure à 1,2 MW, l'évaluation environnementale et économique avantage donc le filtre à manches par rapport à l'électrofiltre.**

En outre, les éléments disponibles ne permettent pas de présenter une évaluation chiffrée des coûts d'exploitations liés à la filtration des poussières compte tenu du faible retour d'expériences disponible, et de l'intégration de ces coûts dans les coûts d'exploitation globaux de la chaufferie. L'évaluation qualitative décrit cependant, pour les principaux postes des coûts d'exploitation (consommations électriques, entretien et maintenance, provisions pour gros renouvellements) l'impact de la mise en place d'un filtre à manches ou d'un électrofiltre.

Enfin, l'étude indique d'autres pistes techniques (condenseur, nouvelle génération de filtres à manches et électrofiltres de petite taille, optimisation de la combustion), qu'il convient de prendre en compte dans le panel de solutions possibles pour le dépoussiérage.