

EVALUATION TECHNICO-ECONOMIQUE DES SYSTEMES DE REDUCTION DES EMISSIONS DE PARTICULES DES CHAUDIERES BIOMASSE

RAPPORT FINAL PUBLIC

Date de l'étude juin 2012

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par INDDIGO

Coordination technique : Florence PROHARAM – Service Bioressources (SBIO) – Direction
Productions et Energies Durables (DPED) – ADEME (Angers)



REMERCIEMENTS

M. Sylvain BORDEBEURE, ADEME Service Bioressources

M. Gilles AYMOZ, ADEME Service Qualité de l'air

M. Romain DONAT, ADEME Ile de France

M. Pierre-Louis CAZAUX, ADEME Centre

M. Michel AZIERE, ADEME Bourgogne

....

Mme Martine LECLERCQ, DGEC

Mme Anne DELORME, DGEC

Mme Alice VIEILLEFOSSE, DGEC

...

En français :

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.

En anglais:

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

Sommaire

1.	INTRODUCTION - CONTEXTE	7
2.	METHODOLOGIE DE L'ETUDE	8
2.1	Visites de sites.....	8
2.2	Entretien d'acteurs.....	8
3.	TECHNOLOGIES ETUDIEES.....	9
3.1	Electrofiltre.....	10
3.2	Filtre à manches	11
3.3	Technologies émergentes	13
4.	PERFORMANCES DE FILTRATION	14
4.1	Performances théoriques.....	14
4.2	Performances des sites visités	15
4.3	Capacité technique d'un abaissement de VLE	16
5.	PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS	17
5.1	Encombrement des systèmes	17
5.2	Préconisations de conception.....	19
5.3	Données d'exploitation	24
5.4	Principaux dysfonctionnements observés.....	27
5.5	Capacité d'adaptation aux variations d'exploitation	29
5.6	Service Après Vente.....	29
5.7	Besoins en formation	29
5.8	Contrôles réglementaires.....	29
6.	ANALYSE ECONOMIQUE	30
6.1	Investissement.....	30
6.2	Incidence de la filtration sur les investissements	33
6.3	Coûts d'exploitation	34
6.4	Synthèse des coûts d'exploitation et ratios	36
6.5	Impact économique d'un abaissement de VLE.....	38
7.	CONCLUSION	40
	ANNEXES	42
	Annexe 1 : Détail des coûts d'investissement et de fonctionnement des systèmes de filtration étudiés	42

Résumé

Les systèmes de filtration qui permettent d'atteindre les Valeurs Limites d'Emission sur les chaudières biomasse se résument aujourd'hui aux **Filtres à Manches (FAM)** et aux **Electrofiltres (ESP)**. Les solutions dites « émergentes » restent des dérivés de ces systèmes avec des changements de matériau au niveau des manches, des changements de configuration avec les électrofiltres cylindriques ou des pré-filtrations avec des cyclones performants ou même des condenseurs.

Ces deux systèmes mettent en œuvre des principes de filtration bien distincts. **La filtration d'un ESP** est considérée proportionnelle aux particules entrantes. C'est pour cela que les émissions garanties en sortie sont fortement dépendantes des particules qui rentrent. En d'autres termes, la filtration d'un ESP est le résultat d'une soustraction du nombre de particules entrantes dans un volume de gaz de combustion moins sa capacité à capter les particules de ce dit volume. Au contraire, **la filtration d'un FAM** a une valeur limite physique due à la maille du textile. Elle fournit donc physiquement un seuil d'émission avec une filtration qui ne dépend pas ou peu de la concentration de poussière en entrée de filtre.

Bien évidemment ces deux principes ont des conséquences différentes mais pas opposées sur la conception, sur la maintenance, le renouvellement ou l'investissement. Les visites effectuées sur les 17 sites et les entretiens d'acteurs du secteur (fabricants de filtre, fabricants de chaudière biomasse, exploitants,...) mettent en évidence ces différences et ces similitudes.

Les deux systèmes possèdent les mêmes contraintes de mise en œuvre sur le flux des gaz de combustion avec dans les deux cas la nécessité d'utilisation d'un multicyclone pour des raisons de sécurité sur le FAM et pour des raisons de performance sur l'ESP. La conception reste similaire dans l'encombrement et la fonctionnalité avec l'utilisation d'organes communs comme le by-pass, le caisson de filtration, l'étanchéité de l'évacuation des fines, le transport des fines et son stockage. Cependant le dimensionnement reste différent avec la température en entrée de filtre qui déterminera la qualité des manches pour le FAM et la quantité de fines qui déterminera l'intensité du champ électrique et la surface de filtration pour les ESP.

Les consommations électriques de fonctionnement, contrairement aux idées reçues, restent plus importantes sur les FAM que sur les ESP avec une surconsommation considérable sur le ventilateur d'extraction due aux pertes de charges et à des fuites usuelles sur le réseau d'air comprimé. Sur un FAM bien dimensionné et une installation correctement exploitée (qualité du combustible, taux de charges de la chaudière), les consommations électriques entre les deux technologies de filtration doivent néanmoins théoriquement rester proches.

A l'exploitation, l'avis des exploitants est unanime : l'ESP requiert moins de temps que le FAM surtout en termes de renouvellement notamment celui des manches. Ajoutées à cela, les fréquences de by-pass seront plus importantes sur les FAM que sur les ESP compte tenu de la sensibilité aux risques de condensation et d'incendie. Les performances qui découlent de cette exploitation semblent différentes des caractéristiques intrinsèques des filtres. En effet, l'étude ne met pas en valeur une différence nette de résultats en termes d'émissions de poussières entre un FAM et un ESP au contraire des valeurs théoriques annoncées. On rappellera encore que les valeurs d'analyses étudiées sont ponctuelles et des valeurs moyennes amplifieraient sans doute le constat de l'influence de la qualité d'exploitation induite par une robustesse des systèmes de filtration.

Cependant, les problèmes d'incendie qu'ont connus les FAM sur les premières installations ne doivent pas être un critère de choix compte-tenu des enseignements en termes de conception mais aussi de choix de constructeur ne connaissant pas ce problème.

Simple en apparence, ces systèmes de filtration nécessitent un entretien rigoureux et des compétences techniques pour assurer des VLE terrain en concordance avec le dimensionnement. De manière générale, le système de filtration est intégré au lot de la chaudière bois, en conséquence les constructeurs de filtre sont peu présents sur les installations et le suivi est réalisé principalement par le fournisseur de chaudière bois. Les exploitants sont insuffisamment sensibilisés aux spécificités d'un système de filtration et doivent être davantage formés pour optimiser le fonctionnement de l'installation et garantir sa pérennité.

En termes d'investissement sur l'ensemble des sites visités, les deux technologies présentent des montants similaires représentant en moyenne 26% de l'investissement du process bois. Pour les puissances petites et moyennes (< 4MW), le coût du filtre peut représenter 30 à 40% du process bois et moins de 20% pour les puissances supérieures, soit de 80 k€ (500 kW) à 500 k€ (15 MW).

Les coûts de fonctionnement des filtres en fonction des charges globales (hors achat de combustible P1) restent eux aussi similaires avec une moyenne à 6.5% sur l'ensemble des sites visités. Il existe une différence plus marquée suivant la puissance des chaudières avec une valeur entre 7 et 10% pour des chaufferies < 2 MW et seulement 5% pour des chaufferies > 5MW.

Sur le prix de vente global de l'énergie en €/HT/MWh comprenant le combustible, la maintenance, le renouvellement, et l'investissement, le poids du filtre suivant la puissance s'élève de 2.5 % à 7% pour les plus petites chaufferies, soit de 2 à 7 €/HT/MWh.

Selon les données recueillies dans cette étude, il existe plusieurs paliers de VLE qui engendrent des surcoûts (investissement et exploitation) pour une installation neuve :

- passage d'une VLE de 150 à une VLE de 75 ou 45 mg/Nm³ à 6 % d'O₂ ;
- passage d'une VLE de 45 à une VLE de 30 ou de 15 mg/Nm³ à 6 % d'O₂.

Dans le cas d'un ESP, pour un passage de 45 à 30 ou 15 mg/Nm³, le surinvestissement sera conséquent pour les petites et moyennes puissances (de l'ordre de 70 % jusqu'à 1 MW ; de 10 à 30 % jusqu'à 4 MW ; au-delà de 6 MW, le surcoût est nul).

Au vu des résultats des mesures sur sites, pour les installations existantes, la mise en œuvre d'une VLE à 30 mg/Nm³ ne devrait pas engendrer de surcoûts importants quelle que soit la technologie. En revanche, dans le cas général, le passage à 15 mg/Nm³ ne pourra pas être réalisé sans surinvestissement important.

Pour conclure, l'étude met en évidence l'importance de la qualité d'exploitation des systèmes et des mesures en continue nécessaires pour confirmer la bonne utilisation de ces filtres.

Abréviations - Définitions

- ✓ **ESP**: ElectroStatic Precipitator
- ✓ **FAM** : Filtre A Manches
- ✓ **MC** : Multicyclone
- ✓ **VLE** : Valeurs Limites d'Emissions
- ✓ **GER** : Gros Entretien Renouvellement (= P3)
- ✓ **ICPE** : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement
- ✓ **P1** : Frais annuels liés à l'achat de combustible
- ✓ **P'1** : Frais annuels liés aux consommations d'électricité
- ✓ **P2** : Frais annuels liés aux opérations courantes d'entretien-maintenance
- ✓ **P3** : Frais annuels liés aux opérations de gros entretien et renouvellement
- ✓ **P4** : Montant de l'annuité de remboursement
- ✓ **RSD** : Règlement Sanitaire Départemental
- ✓ **kW, MW** : Puissance thermique nominale
- ✓ **mg/Nm³** : Unité de mesure des émissions de poussières, le Nm³ correspond au contenu d'un volume de un mètre cube, pour un gaz se trouvant dans les conditions normales de température et de pression (0°C et 1,01325 bar) Toutes les valeurs d'émissions sont données à 6% d'O₂.
- ✓ **Calcul de la concentration d'émission au pourcentage standard d'oxygène :**

$$Es = \frac{21 - Os}{21 - Om} * Em$$

Avec :

Es : la concentration d'émission calculée au pourcentage standard de la concentration d'oxygène sur gaz sec en mg/Nm³ ;

Em : la concentration d'émission mesurée sur gaz sec en mg/Nm³ ;

Os : la concentration d'oxygène standard ;

Om : la concentration d'oxygène mesurée.

Exemple :

50 mg/Nm³ à 11% d'O₂ représente 75 mg/Nm³ à 6% d'O₂

10 mg/Nm³ à 11% d'O₂ représente 15 mg/Nm³ à 6% d'O₂

1. INTRODUCTION - CONTEXTE

Depuis 2009, l'ADEME gère le Fonds chaleur assurant le financement de l'investissement des installations biomasse collectives et industrielles ayant une production thermique supérieure à 100 tep.

L'ADEME a piloté trois programmes bois énergie successifs ayant pour objectif la mise en place d'une filière structurée, pérenne et autonome. Les aides accordées dans le cadre de ces programmes permettent de compenser partiellement le surcoût d'investissement et ont permis la mise en place d'un réseau d'installations de référence.

Par ailleurs, avec l'évolution des exigences pour réduire les émissions de particules, le traitement des fumées est devenu un réel enjeu aussi bien pour les porteurs de projets que pour les financeurs. Plusieurs systèmes de réduction des émissions de poussières existent (seuls ou en couplage de technologies). L'ADEME souhaite, au travers de cette étude, une étude comparative de ces technologies, sur les plans technique et financier et connaître les meilleures techniques disponibles pour atteindre les seuils de poussières réglementaires.

Cette étude s'inscrit dans la continuité :

- De l'étude réalisée en 2007 par INDDIGO pour le compte de l'ADEME « Evaluation technique, environnementale et économique des techniques disponibles de dépoussiérage pour les chaufferies bois de puissance installée comprise entre 0 et 4 MW » avec un approfondissement des coûts réels et un élargissement aux puissances de 4 à 50 MW ;
- De l'étude réalisée en 2009 par PERDURANCE pour le compte de l'ADEME « Evolution des coûts d'investissement relatifs aux installations collectives bois énergie (2000-2006) ;
- De l'étude réalisée en 2010 par PERDURANCE pour le compte de l'ADEME « Evaluation des coûts d'exploitation relatifs aux installations collectives bois énergie ;

Les objectifs de l'étude sont de :

- Fournir un état de l'art des technologies de réduction des émissions de poussières sur les plans technique et économique ;
- Déterminer les coûts d'investissement et d'exploitation de référence, par type d'installation, de systèmes de réduction de particules de chaudières biomasse éligibles au Fonds Chaleur, à partir de sites en exploitation ;
- Dédire les meilleures techniques disponibles de réduction des émissions de poussières sur les plans technique et économique par type d'installation.

L'étude couvre :

- Les chaudières biomasse >100tep/an en sortie chaudière (d'environ 300kW) éligibles au Fonds chaleur et <50MW ;
- Toutes les technologies de réduction des émissions de poussières (innovations incluses) ;
- Les systèmes de réduction des émissions de poussières utilisés dans les sites visités (sites en exploitation à ce jour).

Cette étude intervient aussi dans un contexte de volonté d'abaissement des limites d'émissions de poussières et l'ADEME souhaite se doter d'outils qui lui permettront de définir les VLE atteignables dans le contexte technico-économique actuel et de définir les objectifs à long terme.

2. METHODOLOGIE DE L'ETUDE

2.1 VISITES DE SITES

Cette étude a été réalisée au moyen d'un échantillon de 17 sites en exploitation pour lesquels les caractéristiques techniques et les ratios économiques ont été collectés et analysés.

Toutes les visites de sites ont été effectuées en présence du maître d'ouvrage et de l'exploitant de la chaufferie.

Les visites ont eu lieu durant l'automne 2011.

N°	Puissance Bois en MW	Année mise en service Chaufferie	Marque constructeur chaudière	Marque constructeur traitement poussières	Technique	Type de combustible
1	0,7	2010	MULLER	BETH	Electrofiltre	Plaquette forestière/ connexes de scierie
2	4,0	2009	COMPTE-R	BETH	Electrofiltre	Plaquette forestière (80%)
3	3,2	2000	WEISS	EFI	Electrofiltre	Broyat palettes
4	3,7	2003	WEISS	EFI	Electrofiltre	Plaquette forestière (50%)/ connexes scierie(50%)
5	4,0	2005	COMPTE-R	BETH	Electrofiltre	Ecorce (60%)/plaquette (40%)
6	7,0	2008	COMPTE-R	SIDAC	Electrofiltre	Broyat (50%)/écorce (50%)
7	8,0	1999	WARTSILLA	SIDAC	Electrofiltre	Mélange écorce/déchets scierie/plaquette forestière
8	10,0	2007	COMPTE-R	BETH	Electrofiltre	Plaquette forestière/ connexes de scierie
9	1,9	2009	COMPTE-R	LUHR	Filtre à manches	plaquette forestière (70%)/ connexes de scierie (30%)
10	2,0	2009	COMPTE-R	TECFIDIS	Filtre à manches	plaquette forestière
11	4,0	2005	WEISS	SIDAC	Filtre à manches	Plaquette forestière/ connexes de scierie
12	4,5	2004	WEISS	DANTHERM	Filtre à manches	Broyat de palette(50%)/ plaquette forestière (50%)
13	4,8	2008	WEISS	DANTHERM	Filtre à manches	Connexes de scierie (70%)
14	6,0	2005	WEISS	DANTHERM	Filtre à manches	Plaquette forestière
15	7,0	2008	WEISS	DANTHERM	Filtre à manches	Plaquette forestière (50%) /Divers (50%)
16	14,0	2007	WEISS	DANTHERM	Filtre à manches	Plaquette forestière (50%)/ Divers (50%)
17	15,6	2008	BIOCHAM	NEXT ENERGIES	Filtre à manches	Plaquette/connexes scierie/ bois de rebut

2.2 ENTRETIEN D'ACTEURS

En parallèle des visites de sites, une série d'entretien a été menée avec les différents acteurs de la filière :

- ➔ Fabricants de filtre : Tecfidis (FAM), Glosfume (filtre céramique), APF (électrofiltre tubulaire), ACS (ESP), Uniconfort (filtre à maille inox), Sidac (ESP),
- ➔ Fabricants de chaudières bois : Compte R, Weiss, Muller,
- ➔ Exploitants : Dalkia, Cofely

3. TECHNOLOGIES ETUDIÉES

Les techniques usuelles de filtration des poussières (PM10, PM2.5, PM1) dans le domaine de la combustion de biomasse sont les électrofiltres à plaques (ESP) et les filtres à manches textiles (FAM). Ces systèmes de filtration, issus à l'origine d'autres applications (chaudières charbon, process industriel,...) ont été mis en œuvre sur les chaudières biomasse au début des années 2000. Les paragraphes qui suivent décriront les principes de fonctionnement de ces 2 grandes familles.

Des solutions alternatives ou émergentes seront aussi décrites dans cette partie comme les électrofiltres tubulaires, les filtres à manches inox, les filtres à manches céramiques ou les condenseurs/laveurs.

Le système de filtration est positionné après le dépeussierage mécanique (cyclone) et avant l'extracteur qui crée la dépression foyer. Généralement le système de filtration peut être by-passé pour de multiples raisons que nous verrons par la suite.

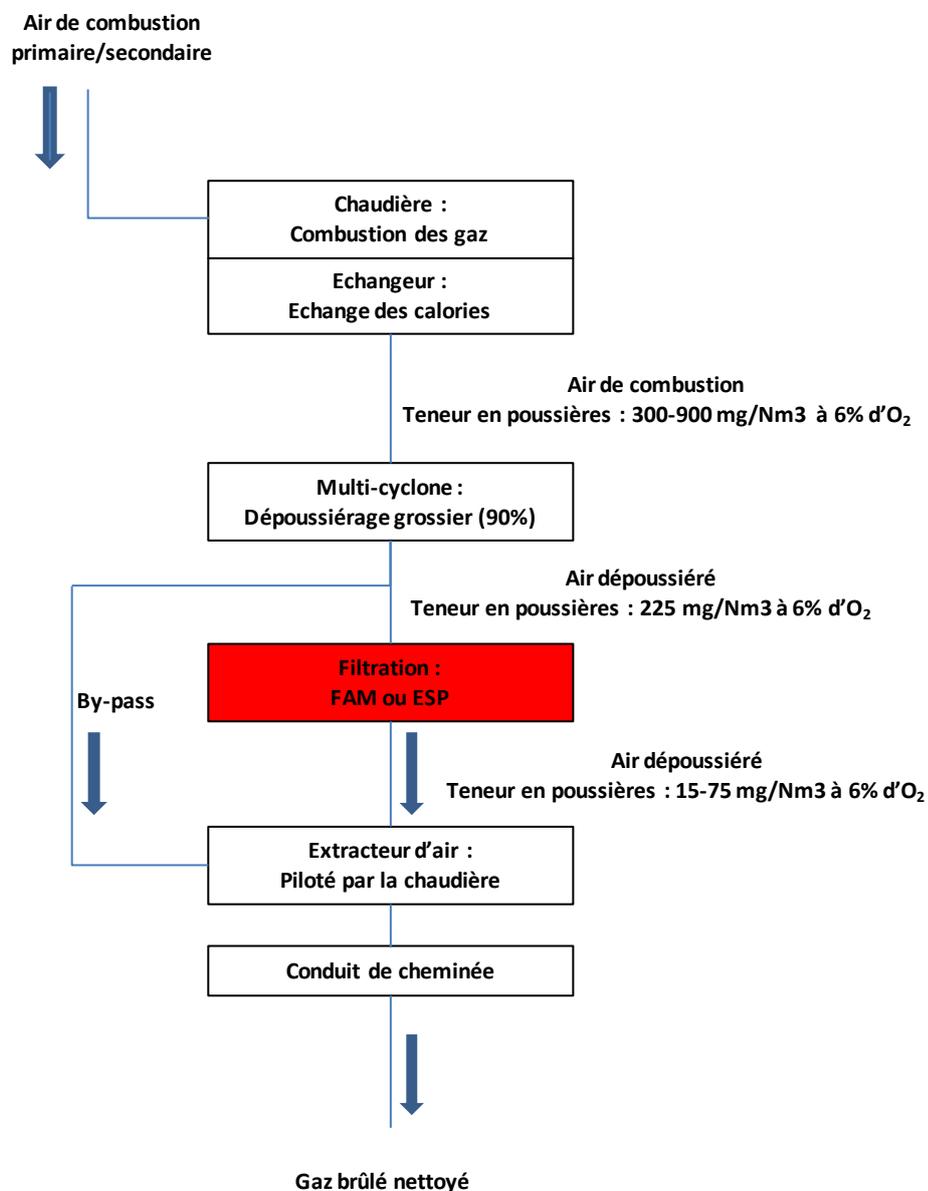


Fig. 1 : cheminement des fumées

3.1 ELECTROFILTRE

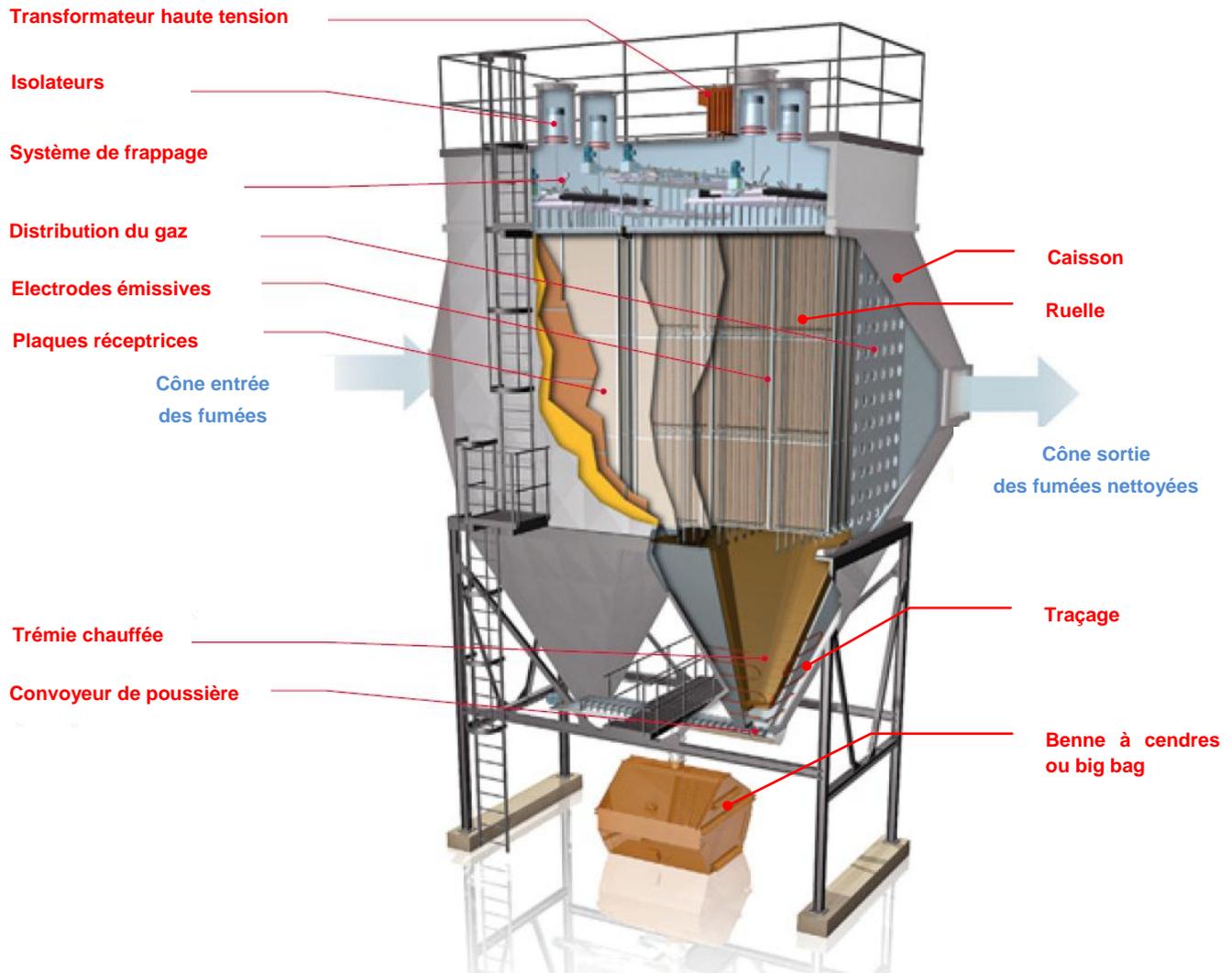


Fig 2 : schéma de principe d'un électrofiltre (source BETH)

Toutes les parties du **caisson** de l'ESP sont réalisées en tôles d'acier soudé en continu. Ce caisson est dimensionné pour les caractéristiques maximales de température et de pression de l'installation. Toutes les parois en contact avec les gaz chauds font l'objet d'une **isolation thermique** à l'aide de laine de roche d'un minimum de 80 mm d'épaisseur afin de ne pas condenser.

La partie supérieure haute tension renferme les **isolateurs** de suspension ainsi que le système de **frappage** composé d'un arbre muni de **marteaux** articulés. Les mats porteurs d'électrodes émissives sont supportés par un cadre auxquels sont suspendus les **isolateurs** en céramique. Le **transformateur** haute tension est relié à l'électrofiltre par un trolley en cuivre disposé dans une gaine.

Les poussières sont récoltées dans la **trémie** et évacuées hors du filtre par une **vis** en plan incliné. Cette trémie dispose à sa base d'un **traçage** électrique évitant le colmatage des poussières au démarrage, une régulation gère la température de ce traçage.

Une porte d'accès permet la visite en partie basse de l'appareil. Le **cône d'entrée** est équipé de grilles de répartition permettant l'utilisation plus rationnelle des surfaces actives de chaque **ruelle** (zone entre plaques réceptrices) de l'appareil. Afin d'affiner cette répartition une grille est également installée dans le cône de sortie.

Un système de **by pass** du filtre peut-être intégré au filtre ou réalisé sur les conduits amont et aval à l'aide de vanne étanche.

L'armoire de régulation haute-tension est positionnée en partie supérieure du filtre alors que l'armoire de régulation du filtre est généralement déportée.

Les gaz à épurer circulent à l'intérieur d'un caisson le long de couloirs parallèles (ruelles) constitués par l'alternance de rangées d'électrodes émissives et de plaques réceptrices. Un champ électrique intense induit par le transformateur haute tension règne à l'intérieur de ces couloirs.

Sous l'effet du champ intense, les particules chargées sont attirées par les plaques (anodes) réceptrices ; Les poussières captées par les plaques réceptrices sont séparées de celles-ci sous l'effet du frappage ou d'un nettoyage et dirigées vers l'installation de transport par l'intermédiaire de la trémie de récupération.

3.2 FILTRE A MANCHES

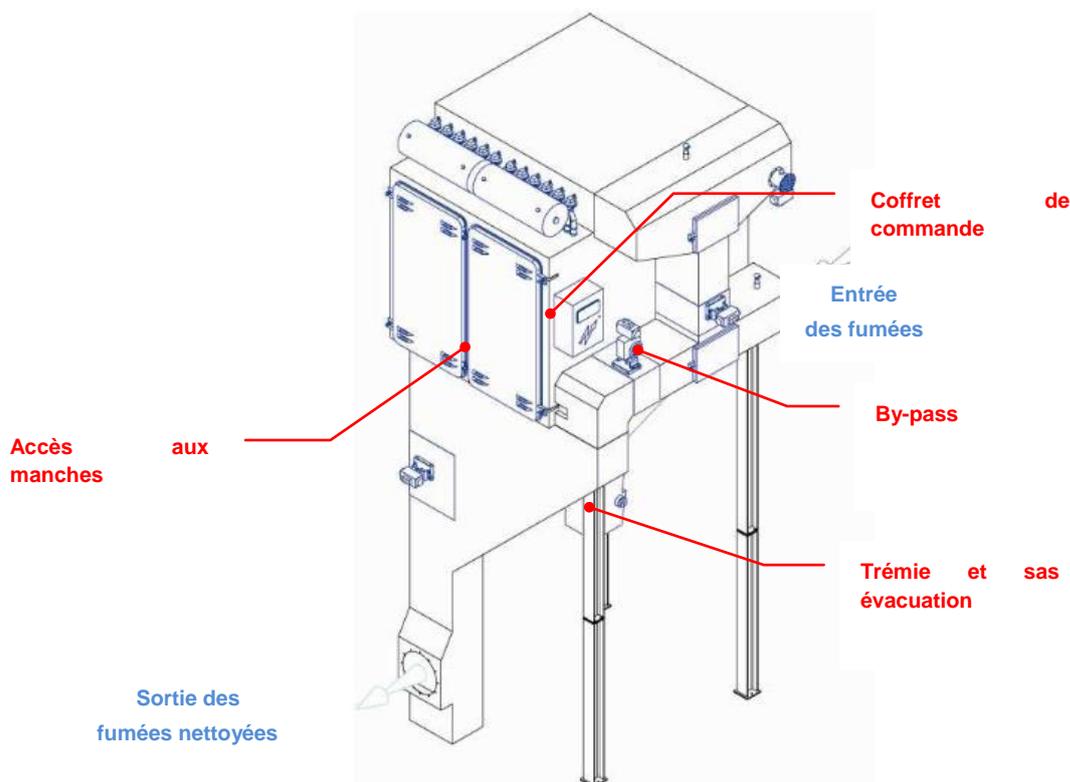


Fig 3 : Schéma de principe d'un filtre à manche (source TECFIDIS)

Le caisson principal du filtre en tôle acier est entièrement calorifugé par de la laine minérale afin d'éviter les phénomènes de condensation. Les portes et trappes d'accès sont également calorifugées. L'ensemble est absolument étanche.

Au moyen de **plaques à trous** le caisson est subdivisé en zones de gaz brut et de gaz épuré. Côté gaz épuré se trouvent des portes aisément manœuvrables, permettant un accès aisé aux plaques à trous. Les éléments filtrants sont constitués de manches disposées horizontalement ou verticalement et mises en place par le côté gaz épuré. Les manches reposent, sans plis, sur toute la longueur, sur des supports à maille. La partie avant des manches est équipée d'une **collerette** destinée à assurer l'étanchéité sur la paroi à trous.

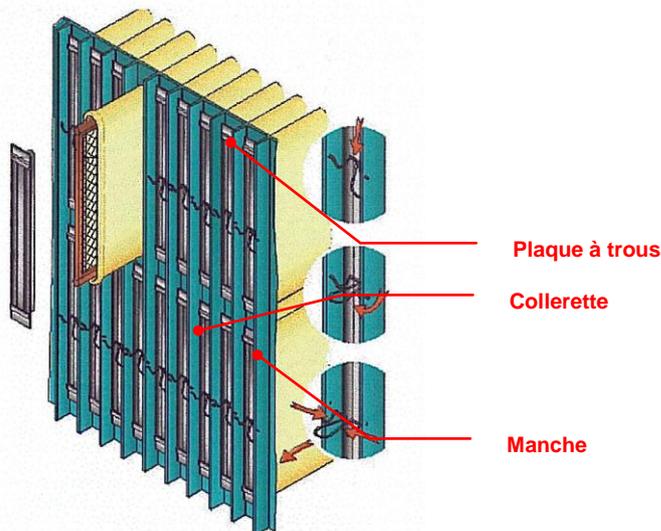


Fig 4-Manches plates horizontales et leur support (Source WEISS)

Les **manches** diffèrent par leur mode de confection (tissu ou feutre), par la fibre qui les constitue avec du PTFE (différents %), du polyimide, de la fibre de verre, polyester, du polyphénylène sulphide (PPS), de l'aramide (Normex) et par le traitement de surface qu'elles ont subi. Les tissus sont constitués de fibres longues entrelacées formant une grille. Systématiquement utilisés il y a quelques années, ils tendent aujourd'hui à disparaître au profit des feutres.

Les feutres aiguilletés sont confectionnés par empilage sur un support formant une grille d'une masse de fibres courtes comprimées mécaniquement sans recours à des produits liants.

Ils sont plus épais, plus denses et offrent des pores plus tortueux et plus nombreux que les tissus, augmentant par conséquent les chances de captation des poussières. Chaque fibre a ses propres caractéristiques (résistance à la température, aux agressions chimiques et mécaniques).

Un feutre peut faire l'objet de divers traitements : flamage, calandrage, laminage, antistatique, hydrophobe, ...

Ces traitements visent à faciliter le décolmatage du gâteau, à arrêter les poussières fines dès la surface pour les empêcher de colmater le média à cœur, à accroître le volume de spores sous la surface pour améliorer l'efficacité du décolmatage et augmenter le débit de gaz ou à renforcer la résistance des supports de filtration dans certaines conditions (humidité, acidité, ...).

Des **passerelles d'accès** permettent d'accéder aux différents éléments du filtre afin de réaliser l'entretien-maintenance et le remplacement des manches.

Les fumées chargées en poussières pénètrent dans le filtre à manches. Ce dernier est constitué de plusieurs cellules de filtration comprenant chacune des rangées de manches ou poches filtrantes. La nature des manches dépend de la température des fumées et de leur composition chimique. 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, qui joue lui-même le rôle de filtre, sur le média filtrant. Le passage des gaz au travers du feutre se fait de l'extérieur vers l'intérieur, les particules étant retenues à la surface externe.

La collecte des gâteaux de filtration est effectuée régulièrement par soufflage d'air comprimé à l'intérieur des manches. Ce **décolmatage** est le plus souvent réalisé par injection d'air (on-line ou off line), mais peut également être réalisé à basse pression à partir d'un ventilateur affecté à cette fonction. Le décolmatage par secouage, technique la plus ancienne, est aujourd'hui pratiquement abandonné.

Le filtre à manches est impérativement équipé d'un ensemble de by-pass en cas de détection de température anormalement haute prévenant ainsi des risques d'incendie ou basse prévenant ainsi des risques de condensation et par conséquence de colmatage.

3.3 TECHNOLOGIES EMERGENTES

Nom (fabricant)	Principe et stade de développement	Performance à 6% d'O ₂	Intérêts	Limites
Electrofiltre tubulaire (APF)	<p>Même principe de fonctionnement que l'ESP à plaques</p> <p>De nombreuses installations en Autriche et Suisse pour des unités petites et moyennes (500 kW à 2 MW)</p>	<p>75 et 45 mg/Nm³</p> <p>Possibilité de descendre à 15 mg/Nm³ en surdimensionnant</p>	<p>Gain de place grâce à la surface développée par les cylindres</p> <p>Nettoyage par brosse (pas d'équipement de frappage à remplacer et pas de bruit lié au frappage)</p>	
Filtre à maille Inox (Uniconfort)	<p>Idem FAM, Tissu filtrant en inox.</p> <p>Stade de l'innovation</p>	<p>Maille très fine permettant d'atteindre < 22 mg/Nm³</p>	<p>Résiste haute T° (500°C)</p> <p>Longévité accrue des manches</p> <p>Possibilité de lavage des manches</p>	<p>Technologie au stade de l'innovation (peu d'installations équipées et de retour terrain)</p> <p>Peu de retour sur durée de vie</p>
Filtre céramique (Glosume)	<p>Idem FAM, éléments filtrants verticaux en céramique microporeux</p> <p>Quelques installations en fonctionnement en France sur des unités petites et moyennes (500 kW à 1 MW)</p>	<p>Performance < 15 mg/Nm³ (voir moins 1 mg/Nm³)</p>	<p>Stabilité thermique et mécanique</p> <p>Encombrement réduit</p>	<p>Coût élevé des cartouches céramiques (X 2 ou 3 par rapport aux manches classiques)</p> <p>A réserver aux usages peu chargés (granulés)</p> <p>Peu de retour sur durée de vie</p>
Condenseur laveur (Scheuch)	<p>Les fumées sont aspergées d'eau ce qui provoque un refroidissement et la condensation de la vapeur d'eau.</p> <p>Cette vapeur d'eau est alors chargée en poussières</p> <p>Technologie très développée dans le nord et l'est de l'Europe. Quelques projets en cours en France</p>	<p>Performance < 75 mg/Nm³ : système insuffisant en traitement des poussières</p> <p>Si couplé à un autre système de filtration (ESP ou FAM) performances < 15 mg/Nm³</p>	<p>Permet d'associer récupération d'énergie et dépolluage</p>	<p>Sensible à l'encrassement si fumées chargées (condenseur à positionner en aval du système de filtration)</p> <p>Traitements des condensats à prévoir</p>
Multicyclone à recirculation (ACS)	<p>L'efficacité du système repose sur le recyclage des particules grâce à un système d'effet venturi.</p> <p>Pas de retour terrain, société créée en 2008</p>	<p>Un multicyclone à recirculation permet de diminuer les émissions des cyclones classiques seuls de 40 à 60%.</p>	<p>Plus efficace qu'un multicyclone traditionnel</p> <p>ACS propose également un multicyclone électrostatique permettant de capter davantage de particules</p>	<p>Efficacité réelle du procédé. En attente de retour terrain</p>

4. PERFORMANCES DE FILTRATION

4.1 PERFORMANCES THEORIQUES

La filtration d'un ESP, au contraire d'un FAM, qui a une valeur limitée physique due à la maille du textile, est considérée comme proportionnelle aux particules entrantes. C'est donc pour cela que les émissions garanties en sortie sont fortement dépendantes des particules qui entrent. En d'autres termes, la filtration d'un ESP est le résultat d'une soustraction du nombre de particules entrantes par la capacité à filtrer de l'électrofiltre.

Les seuils de performance garantis par les constructeurs d'ESP sur les sites visités varient de **45 à 150 mg/Nm³ à 6% d'O₂**.

La performance attendue de l'équipement a une incidence forte sur le dimensionnement et par conséquent sur les coûts des équipements, variables selon leur taille et la technologie choisie.

Le rendement de filtration change avec la concentration de poussière en entrée de filtre. Ce paramètre est de facto un élément prépondérant de dimensionnement du filtre.

La filtration d'un FAM a une valeur limite physique due à la maille du textile. Elle fournit donc physiquement un seuil d'émission. Les « gâteaux » formés sur les manches possèdent un pouvoir filtrant lié à leur porosité qui s'ajoute à celui des manches elles-mêmes. Il en résulte la capacité des filtres à manches à fixer les particules très fines. De plus, contrairement à l'ESP, le rendement de filtration ne change pas avec la concentration de poussière en entrée de filtre.

Les seuils de performance garantis par les constructeurs de FAM sur les sites visités varient de **75 à 15 mg/Nm³ à 6% d'O₂**. Ces seuils de performance varient en fonction de la nature des manches essentiellement et en fonction de la qualité du combustible.

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.

Les émissions garanties ne prennent pas en compte les by-pass ou les arrêts du champ électriques du filtre qui sont plus ou moins fréquents en fonction des technologies et des fournisseurs. L'inactivation de la filtration (by-pass ou arrêt champ) est plus fréquente sur un FAM que sur un ESP.

D'une manière générale, les fournisseurs de FAM garantissent des valeurs plus basses d'émission compte tenu essentiellement du mode limitatif de filtration.

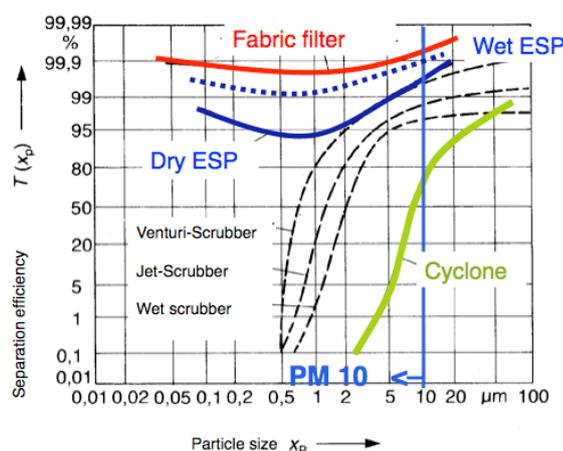


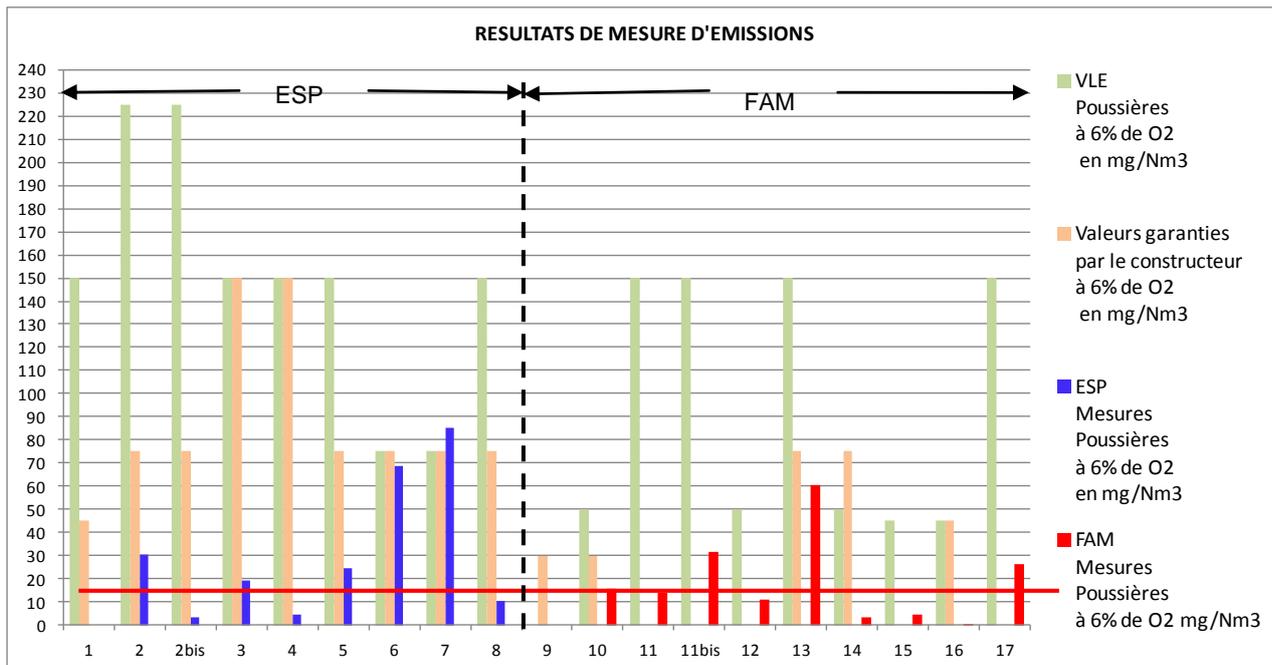
Fig 5 - Performances de filtration en fonction de la taille des particules

D'un point de vue théorique et expérimental, les performances en termes de limitation d'émission de particules du FAM sont meilleures que celle que soit la taille de la particule par rapport à un ESP.

Cependant, les retours de visites ne sont pas si catégoriques. Cette pondération provient de la notion d'exploitation qui n'intervient pas dans les études théoriques qui sont prépondérantes dans nos retours de sites.

4.2 PERFORMANCES DES SITES VISITES

Ces valeurs sont issues des dernières analyses réglementaires réalisées sur chaque installation visitée. Ces valeurs ne sont pas des analyses continues, la fréquence d'utilisation du by-pass ne peut être retranscrite. Elles traduisent sans doute un ordre de grandeur d'émission et non pas une moyenne pondérée et encore moins une valeur maximale d'émission.



Seul le site n°7 ne respecte pas la VLE.

Les raisons semblent multiples :

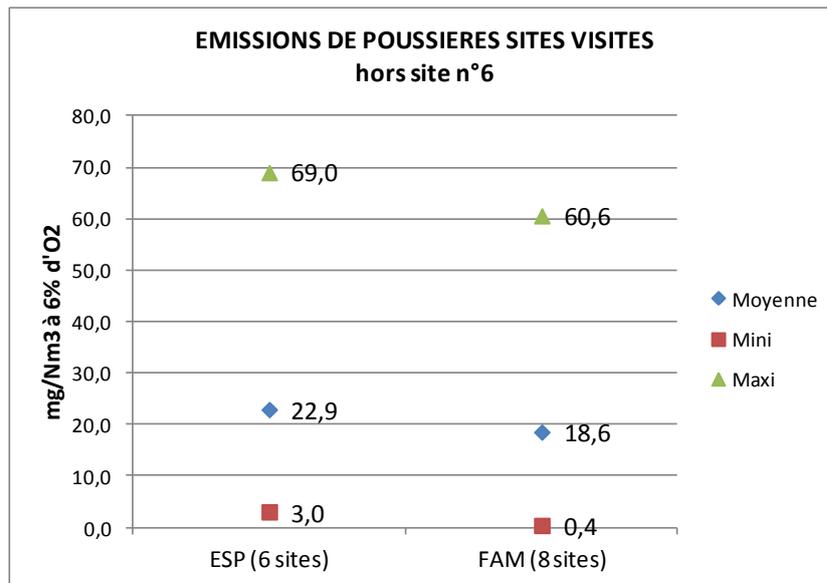
- un combustible contenant une fraction de fines très importante (< 3 mm de l'ordre de 30%),
- un mauvais fonctionnement du multicyclone avec des tubes percés (remplacés en 2011),
- un dysfonctionnement au niveau de la grille de la chaudière et du foyer (remplacement de l'ensemble en 2011).

Le site n°6 frôle la VLE, car l'ESP est sous-dimensionné.

Le site n°13 présente des valeurs élevées pour un FAM (60 mg/Nm³), les raisons semblent liées à la qualité des manches et/ou à l'étanchéité du filtre, source importante de dérive des performances.

Les mesures n'ont pas pu être effectuées sur les sites n°1 et n°9. Sur le site n°16, une émission de poussières très faible a été constatée (0.4 mg/Nm³ à 6 % de O₂).

Il est important de constater que, pour toutes les installations, les valeurs garanties par le constructeur sont supérieures ou égales à 30 mg/Nm³ à 6 % de O₂.



La moyenne des résultats d'émissions de poussière sur les installations avec des FAM de **18.6 mg/Nm3** est inférieure à la moyenne sur les installations avec des ESP qui est de **22.9 mg/Nm3**. Cependant la différence en valeur absolue n'est pas évidente. Les 2 technologies ont des performances brutes similaires sur des mesures ponctuelles.

4.3 CAPACITE TECHNIQUE D'UN ABAISSEMENT DE VLE

Les systèmes de filtration actuels que sont l'ESP et le FAM ont les capacités techniques pour respecter un rejet de 15 mg/Nm3 de poussière en lieu et place de 75 voir 45 ou 30 déjà mis en place sur certaines installations. Cependant les incidences sont différentes pour chacun.

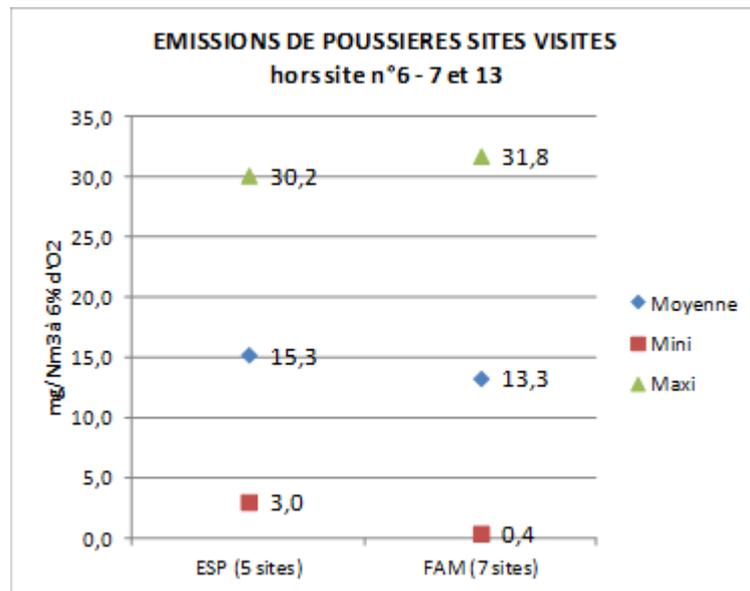
4.3.1 INCIDENCE TECHNIQUE

Pour les **ESP**, ce seuil technique sera absorbé par le surdimensionnement du filtre en augmentant la surface de filtration et l'intensité de filtration. L'augmentation de la surface de filtration augmentera le temps de parcours des particules dans le filtre améliorant ainsi le taux de séparation.

Les contraintes seront le surinvestissement et la place disponible si la chaufferie est existante.

Pour les **FAM**, la technique est existante avec l'utilisation à minima d'une manche 80% PTFE-20% P84 ce qui semble être le meilleur rapport technico-économique pour les constructeurs. La tenue en température, sa tenue à la déformation, et la taille de sa maille permettent à ce matériau de respecter aujourd'hui ce seuil.

4.3.2 RELATION AVEC LES SITES VISITES



En reprenant les valeurs des analyses de fumée des sites visités, et en excluant les sites avec de mauvaises performances pour les raisons précédemment citées, on se rend compte que d'ores et déjà les valeurs moyennes de rejet sont proches du seuil de 15 mg/Nm³. Cependant, les valeurs maximales sont plutôt à 30 mg/Nm³ soit le double.. Ajouté à cela, on rappellera que ces valeurs sont des valeurs ponctuelles et qu'elles sont sous-estimées par rapport à des valeurs moyennes annuelles.

Ces résultats montrent que les installations correctement dimensionnées peuvent respecter une valeur limite d'émission de 30 mg/Nm³. Par contre, le passage à 15 mg/Nm³ (facteur ½) sera beaucoup plus difficile pour les installations existantes et demandera un surinvestissement conséquent.

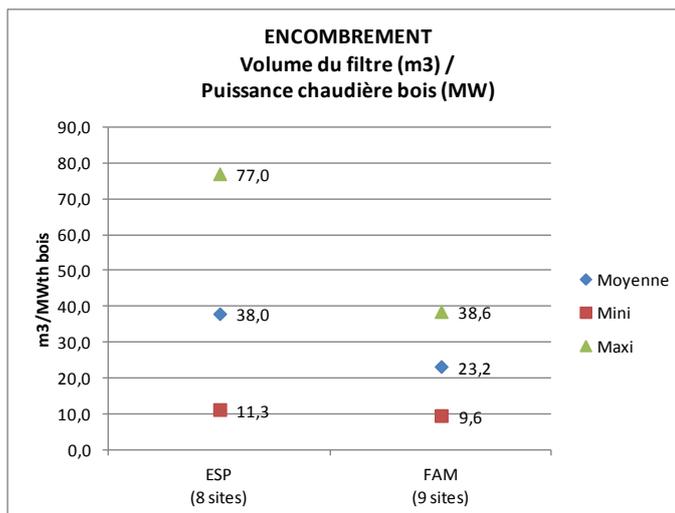
5. PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

5.1 ENCOMBREMENT DES SYSTEMES

On caractérise l'encombrement des filtres en mettant en corrélation le volume brut du filtre (côtes hors tout de la machine y compris passerelles d'accès et d'entretien) et le nombre de MW de chaudières bois installées.

Pour les FAM, on observe une tendance à la diminution du ratio m³/MW bois pour les puissances moyennes et grosses (inférieure à 20 m³/MW bois au-delà de 4 MW).

En revanche, pour les ESP, cette tendance n'apparaît pas clairement. Il semble par contre y avoir une corrélation avec le fabricant de filtres. Les ESP les plus volumineux sont ceux pour lesquels l'écartement entre ruelles est de 400 mm contre 300 à 200 mm pour les autres.

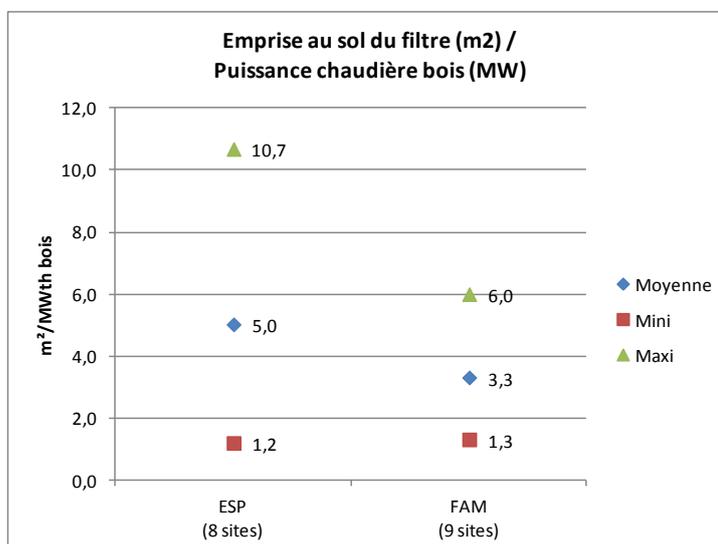


ESP : la moyenne des volumes constatée sur les sites visités est de **38 m³/MW de chaudière bois installée** avec une très forte amplitude.

FAM : la moyenne des volumes constatée sur les sites visités est de **23 m³/MW de chaudière bois installée** avec une tolérance moyenne (+/-13 m³/MW).

On constate donc des volumes de filtration 1.5 fois plus élevés sur les ESP que sur les FAM et ce malgré des surfaces de filtration nécessaires inversement proportionnelles. L'utilisation de manches permet d'augmenter la surface de filtration en réduisant le volume brut nécessaire. On retrouve cette caractéristique pour les ESP cylindriques, dont la surface développée est très importante au regard de l'encombrement.

A noter que cet écart entre ESP et FAM sera d'autant plus accentué avec l'abaissement des VLE. Un seuil à 15 mg/Nm³ imposera un surdimensionnement de l'ESP et donc un encombrement d'autant plus important.



L'emprise au sol est également moindre pour un FAM que pour un ESP. De façon générale, le FAM est plus modulaire et s'intègre mieux dans un espace confiné.

A noter tout de même que pour un FAM, il est important de bénéficier d'un dégagement suffisant à l'avant du filtre permettant de sortir les manches pour leur remplacement.

La longueur des manches étant variable suivant les fabricants, il est important d'intégrer ce paramètre au moment de la conception, notamment si le filtre est ajouté dans un bâtiment existant. La longueur d'une manche varie généralement entre 2 et 3 m.

5.2 PRECONISATIONS DE CONCEPTION

5.2.1 EMBLACEMENT DU FILTRE

Que ce soit un filtre à manche ou un électrofiltre, il est fortement conseillé d'installer le filtre à l'intérieur de la chaufferie, ceci afin de limiter les risques de condensation préjudiciable au fonctionnement du filtre et de réduire les consommations liées au système de chauffage de la trémie et du filtre.

Un emplacement extérieur peut également occasionner des nuisances acoustiques lors des cycles de décolmatage du filtre (frappage des plaques ou injection d'air comprimé).

5.2.2 TYPE DE COMBUSTIBLE

Le combustible a une incidence importante sur le dimensionnement de l'ESP. En effet, si la quantité de fines en entrée de l'ESP augmente (particules susceptibles de voler dans le corps de chauffe), la surface de captation doit elle aussi augmenter pour obtenir une même efficacité pour un même débit de fumées à filtrer. Dans le cadre de l'utilisation d'un ESP, il faut donc savoir anticiper la typologie du combustible.

Pour le FAM l'incidence de la quantité de fine sera forte sur la fréquence de décolmatage mais pas sur son dimensionnement.

A noter que les agro combustibles ont généralement des teneurs en chlore et en soufre plus élevées que la biomasse traditionnelle et conduisent à la formation de fumées acides très corrosives. Le choix du filtre et du média filtrant devront intégrer ce paramètre.

5.2.3 VOLUME DE FUMÉES A TRAITER

Ce volume doit être identifié en plus de la quantité de poussières dans ce volume afin de dimensionner parfaitement la surface de filtration. Il est fonction de la puissance de chaudière et de son échangeur.

5.2.4 TAUX DE TRAVAIL

Le taux de travail caractérise la vitesse maximum de déplacement des fumées dans le système de filtration. Une vitesse trop élevée dans un ESP pourrait faire chuter l'efficacité du filtre et dans un FAM détériorer prématurément les manches. Une vitesse trop faible engendrerait un surdimensionnement et par conséquent un surcoût.

Pour un ESP, on constate une vitesse moyenne de l'ordre de **130 m/h**.

Pour les FAM, d'après les constructeurs, le taux de travail en application biomasse ne doit jamais dépasser **60 m/h**, une valeur plus élevée signifie que le filtre est sous-dimensionné ce qui induit des surconsommations d'électricité, une difficulté à décolmater les manches et plus de risque de by-pass.

5.2.5 TYPE DE CHAUDIERE UTILISEE

Le type de chaudière influe sur la quantité de poussières en sortie de cette dernière ainsi que sur la vitesse des fumées. Selon la forme du corps de chauffe, les particules volantes auront plus ou moins tendance « à voler » et donc à sortir de ce dernier. On pourra donc pour un même combustible avoir en sortie de chaudière 600 ou 300 mg/Nm³.

5.2.6 COUPLAGE AVEC UN MULTICYCLONE

Pour l'ESP, cela permet une pré-filtration et induit une meilleure limite d'émission garantie. On le considérera comme fortement recommandé pour ce dernier. L'absence de multicyclone en amont implique un surdimensionnement de l'ESP et donc un surcoût important (prix multiplié par 2 pour conserver les mêmes performances).

Pour le FAM cela n'induit pas de meilleures performances mais permet d'augmenter la durée de vie des manches en limitant le colmatage et en réduisant la fréquence d'insufflation d'air sous pression.

Le multicyclone assure environ 90% de la pré-filtration et permet de retenir les particules incandescentes susceptibles de déclencher un incendie.

Afin d'assurer un vrai rôle dans la chaîne de filtration, le multicyclone doit également être correctement conçu, à savoir :

- Moteur vibrant sur la trémie,
- Pente à 55° minimum et détection de bourrage dans la trémie pour éviter les bourrages et l'envol de cendres incandescentes vers le filtre,
- Calorifugeage.

Par ailleurs, la présence d'un multicyclone permet de conserver un niveau de filtration minimum en cas de by-pass du filtre (de l'ordre de 150 à 225 mg/Nm³) et il est nécessaire dans tous les cas.

5.2.7 PRECONISATIONS SPECIFIQUES A L'ELECTROFILTRE

L'écartement des ruelles : (écartement entre plaques réceptrices)

Ce paramètre joue un rôle primordial sur la captation ; on se rend compte que plus cette distance est importante et plus la particule ionisée durant son parcours au sein du système de filtration a des chances de ne pas être attirée puisque l'attraction n'est pas complètement perpendiculaire (la particule se déplace dans tous les cas vers la sortie).

La surface de plaques réceptrices et leur nombre :

Plus la surface de filtration est importante et plus la qualité de la filtration est bonne. Les fournisseurs ont tendance à dire qu'un ESP bien dimensionné est un ESP dimensionné pour la puissance supérieure.

La configuration de l'ESP :

Il existe des ESP à plaques verticales (technologie la plus courante) et des ESP cylindriques verticaux. L'atout des ESP cylindriques est l'homogénéité de la vitesse du gaz avec une qualité d'attraction identique dans toutes les parties du filtre, ainsi que sa compacité (surface développée d'un cylindre).

Le frappage ou nettoyage des plaques :

Le frappage doit être réalisé de manière efficace et utile ; des cycles trop fréquents sont synonymes de surconsommations électriques et d'usure prématurée des supports de marteaux. Le frappage a lieu de manière séquentielle.

Le choix de l'ESP doit se porter sur un électrofiltre qui n'arrête pas son champ électrique au cours du nettoyage afin d'éviter l'aspiration des particules par les fumées. Les ESP cylindriques qui sont nettoyés avec des balais n'arrêtent pas leur champ magnétique.

5.2.8 PRECONISATIONS SPECIFIQUES AU FILTRE A MANCHES

Le choix du média filtrant :

Fibre	Température maximale des fumées	Température de fonctionnement	Prix	Remarque
100% PTFE	250°C	220°C	€€€€€	Réservé à l'incinération
80% PTFE – 20% P84®	220°C	200°C	€€€€	
50% PTFE – 50% P84®	200°C	180°C	€€€	
Polyphénylène sulphide (PPS)	150°C	130°C	€€	Nécessite économiseur en amont pour abaisser T° fumées
Aramide (Nomex®)	150°C	130°C	€	
P84 (100%)	Utilisation déconseillée			

A retenir : le coût des manches peut être très élevé à l'investissement et en renouvellement, c'est pourquoi il est conseillé une bonne conception pour choisir le média adapté aux conditions (type de bois, T° fumées,...).

La configuration des manches :

Il existe des filtres à manches horizontales et manches verticales. L'entretien est plus aisé sur les manches horizontales : il est plus facile de les extraire du filtre. De plus, les manches horizontales ne subissent pas les efforts de

traction auxquels sont soumises les manches verticales par leur propre poids et celui des poussières qui les recouvre, par conséquent la durée de vie des manches horizontales serait supérieure.

Les filtres à manches horizontales sont généralement plus adaptés aux petites unités qui ne disposent de la hauteur suffisante pour des filtres à manches verticales.

Quelque soit la configuration retenue, il est nécessaire de prévoir un dégagement nécessaire en haut du filtre ou à l'avant du filtre pour extraire les manches lors de leur remplacement.

Le type de manches :

Différence entre manches et poches : les poches sont de forme elliptique et les manches plus sphérique d'où une pression sur la section plus homogène au moment du décolmatage et moins d'accumulation de dépôt, ce qui limiterait les risques d'incendie dus à la réaction exothermique entre la chaux vive et la présence d'humidité.

Le décolmatage des manches :

Le décolmatage doit être réalisé de manière efficace et utile : des cycles trop fréquents sont synonymes de surconsommations électriques et d'usure prématurée des manches. Il faut éviter les décolmatages programmés de manière cyclique. Le décolmatage doit être déclenché en fonction de la perte de charge mesurée entre la sortie et l'entrée du filtre.

Le décolmatage est enclenché à partir d'un seuil de perte de charge prédéfinie (~ 150 mmCE) et ne s'arrête que lorsqu'un certain seuil de perte de charge est atteint (~ 125 mmCE) : la présence de poussière résiduelle reste un atout pour la filtration. On considère une perte de charge « idéale » de l'ordre de 100 à 150 mmCE.

En cas de perte de charge très élevée, il est préconisé de prévoir un by-pass permettant de réaliser un décolmatage complet plus efficace.

5.2.9 ETANCHEITE DU SYSTEME

Celle-ci est assurée par une écluse rotative en bas de trémie pour l'évacuation des fines. Primordiale pour éviter les appels d'air pouvant attiser des cendres chaudes et provoquer des départs d'incendie, une mauvaise étanchéité induira également une surconsommation d'électricité du ventilateur d'extraction.

L'étanchéité peut être faite directement sur la benne de récolte des fines. Cependant, cela implique une perte d'étanchéité au cours de l'enlèvement de la benne et par conséquent un by-pass du filtre.

Le contrôle du système d'étanchéité de l'installation est un des critères primordiaux de la bonne exploitation d'un filtre. C'est d'autant plus vrai sur les filtres à manches.

5.2.10 EVACUATION DES CENDRES

Il existe plusieurs solutions :

- Directement via un big bag placé sous la trémie : simplicité de mise en œuvre et faible coût, mais nécessite un enlèvement régulier par l'exploitant. Plusieurs cas de départ incendie ont été signalés dans des big bag (réaction exothermique liée à la chaux vive présente dans les fines et l'humidité environnante) ;
- Chaîne d'évacuation automatisée via vis sans fin vers benne extérieure : entièrement automatisée mais plus de matériel et consommations électriques liées aux moteurs des vis.

Pour les chaudières à grilles, il est conseillé de réaliser la séparation suivante :

- évacuer les cendres sous foyer à part afin de les valoriser,
- dissocier les résidus du multicyclone et les fines issues du système de filtration où se concentrent tous les métaux lourds afin de minimiser les quantités de matière à enfouir.

Dans la plupart des cas, les fines du multicyclone sont mélangées avec les cendres sous foyers, ce qui permet d'avoir une seule chaîne d'évacuation, mais ce qui peut rendre impossible la valorisation agronomique. Les fines sont en effet généralement plus concentrées en métaux lourds. Le mélange des fines issues des électrofiltres et filtres à manches avec les cendres sous foyers et les fines du multicyclone est à proscrire.

Les conditions d'épandage des cendres de chaudières bois sont peu définies. Seules les installations soumises à autorisation ($P > 20$ MW) font l'objet de 2 arrêtés (20/07/2002 installations nouvelles et 30/06/03 installations existantes) fixant entre autres les seuils limites en métaux lourds. Pour les installations entre 2 et 20 MW (soumise à déclaration),

l'arrêté du 25 juillet 1997 reste ambigu : il prévoit la valorisation mais interdit l'épandage. Si les cendres ne peuvent faire l'objet d'une valorisation, elles doivent être envoyées en CET de classe 1 ou 2. Les installations inférieures à 2 MW sont soumises au RSD, qui ne précise rien à ce sujet.

A noter qu'il est fortement conseillé de prévoir un moteur vibrant sur la trémie permettant de prévenir l'accrochage des cendres sur les parois et dans les angles de la trémie. Mise en route en même temps que les autres organes d'extraction, la trémie sera également pourvue d'un système de détection des bourrages (ex : sonde de niveau à palettes rotatives, ...).

5.2.11 CONCEPTION ET FONCTIONNEMENT DU BY-PASS

Le by-pass n'est pas un élément indispensable pour un ESP, mais sa présence permet d'éviter les phénomènes de condensation acide accentuée par l'ionisation. Le by-pass n'aura pas d'incidence sur les performances mais permet d'augmenter la durée de vie du filtre.

A noter qu'en l'absence de by-pass, en cas de températures basses, les modules haute tension ne sont plus alimentés ou en mode dégradé, la filtration n'est alors plus active.

En revanche, le by-pass est obligatoire pour un FAM : il doit être by-passé pour se prémunir des risques de condensation dès lors que l'un des événements suivants se produit :

- la température des fumées est inférieure à une consigne définie par le fabricant (généralement ~ 120-140°C) : c'est le cas en phase de démarrage chaudière ou en fonctionnement à faible puissance,
- arrêt de la chaudière manuel ou suite à un défaut,
- passage en arrêt thermostatique,
- T° fumées trop élevée pour les FAM pour se prémunir des risques d'incendie.

En fonctionnement optimal, le filtre ne doit pas être by-passé pendant les phases de décolmatage, si c'est le cas, cela reflète un filtre sous-dimensionné ou un combustible inadapté (fortement poussiéreux).

Le by-pass doit être parfaitement étanche. En cas de performances attendues < 15 mg/Nm³, l'étanchéité à l'air du by-pass devra être renforcée notamment une attention particulière sur la qualité des registres (registres à contre pression) devra être apportée.

5.2.12 RISQUES DE CONDENSATION

La condensation doit être évitée à tout prix dans l'ESP et le FAM. En effet, si l'humidité ou les goudrons contenus dans les fumées se déposent, une pâte colmatante va se former avec les poussières et les cycles de décolmatage ne pourront pas la décoller des plaques ou des manches.

Pour prévenir les risques de condensation, il est préconisé :

- d'isoler le caisson du filtre et la trémie,
- de chauffer le caisson du filtre et la trémie pour insufflation d'air chaud,
- de chauffer la trémie par cordon chauffant,
- de by-passer le filtre dès que la température des fumées est trop basse (< 100°C).

Afin d'éviter les condensations de vapeur d'eau et le dépôt de poussières sur les isolateurs, la partie supérieure haute tension est souvent pressurisée par de l'air chaud issu d'une batterie de chauffage alimentée en air par un ventilateur extérieur.

5.2.13 SECURITE

Les dispositifs de sécurité suivants doivent être prévus sur l'installation d'un ESP :

- Si le chauffage ou si un des éléments de la chaîne d'extraction (vis-écluse-moteur vibrant) est en défaut, le filtre est by-passé automatiquement.

- Mesures de température du filtre pouvant entraîner, suivant les seuils, un message d'alerte, le by-pass et un arrêt de l'installation
- Mesures de température trémie pouvant entraîner, suivant les seuils, un message d'alerte, le by-pass et un arrêt de l'installation.
- Détection d'une surtension.

Compte-tenu du risque d'incendie possible sur un filtre à manches, les dispositifs de sécurité sont plus contraignants. Il faut donc prévoir sur l'installation :

- Si le chauffage ou si un des éléments de la chaîne d'extraction (vis-écluse-moteur vibrant) est en défaut, le filtre est by-passé automatiquement.
- Mesures de température du filtre, pouvant entraîner suivant les seuils soit un message d'alerte, soit le by-pass ou une mise en route de **l'arrosage automatique/manuel** et un arrêt de l'installation.
- Mesures de température trémie pouvant entraîner suivant les seuils soit un message d'alerte, soit le by-pass ou une mise en route de **l'arrosage automatique/manuel** et un arrêt de l'installation.
- Mesures de perte de charge pouvant entraîner suivant les seuils de réglage, un décolmatage classique ou complet ou un arrêt de l'installation
- Détection des bourrages trémie par sonde de niveau entraînant l'arrêt de l'installation.

Un système de détection des surchauffes dans le filtre/trémie avec renvoi d'alarme sera impérativement mis en place. En cas de départ d'incendie, le FAM doit être équipé d'une rampe d'arrosage permettant d'arroser indépendamment le caisson des manches ou seulement la trémie, suivant le lieu de l'incendie.

En cas d'arrosage des manches, celles-ci deviendront inutilisables et nécessiteront un remplacement particulièrement coûteux. C'est pourquoi de nombreux exploitants décident de déconnecter l'arrosage automatique et préfèrent gérer manuellement sa mise en route suivant les alarmes de surchauffe. Cela permet d'éviter les risques d'arrosage intempestif mais demande une vigilance accrue de l'exploitant.

De même, au niveau de la trémie, une sonde de température doit permettre de détecter une surchauffe anormale et d'enclencher l'arrosage automatique mais uniquement sur la trémie.

Certains fabricants de FAM proposent des systèmes permettant de détecter/réduire les particules incandescentes arrivants dans le filtre (détection optique, dispositif de retenu, ...). Ces dispositifs restent néanmoins très coûteux. Il faut donc avant tout privilégier une bonne conception générale de l'installation qui permettra de se prémunir des risques d'incendie.

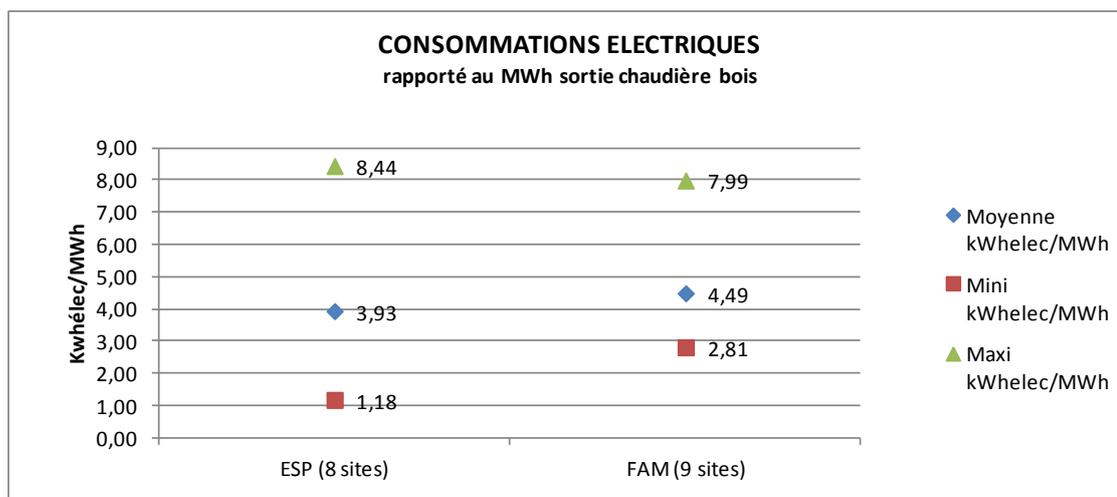
5.3 DONNEES D'EXPLOITATION

5.3.1 P'1 : CONSOMMATIONS ELECTRIQUES

Les postes les plus consommateurs pour un **ESP** sont l'unité haute tension et le chauffage de la trémie. La variation de puissance sur l'unité haute tension peut être importante et par conséquent la consommation électrique aussi. Au contraire des FAM, les consommations sur les ventilateurs sont réduites puisqu'il y a peu de pertes de charges.

Les postes les plus consommateurs pour un **FAM** sont le ventilateur d'extraction et le compresseur. L'incertitude est forte sur ces 2 postes selon les sites. L'encrassement aléatoire du filtre augmente les pertes de charges et donc la consommation électrique du ventilateur ainsi que les fuites au niveau du compresseur qui sont souvent nombreuses.

Ces consommations électriques ont été estimées en relevant les puissances des auxiliaires rencontrés sur site et en estimant avec l'exploitant le temps de fonctionnement constaté par ce dernier.



On note une consommation électrique moyenne ramenée au MWh sortie chaudière bois plus importante pour les FAM que pour les ESP mais une plus grande disparité de consommation pour les ESP entre les sites concernés provenant de la variation de la puissance de l'unité haute tension.

Les consommations électriques d'un FAM sont fortement liées au bon dimensionnement du filtre, un filtre sous-dimensionné colmatra plus vite ce qui entrainera davantage de consommations électrique lié aux pertes de charge et d'air comprimé (cycle de décolmatage plus fréquents)

5.3.2 P2 : ENTRETIEN-MAINTENANCE

Il est difficile de connaître le temps réel passé sur le filtre par les exploitants, car les tâches ne sont pas détaillées. Mais en général, sur une installation correctement conçue et quelle que soit la taille de l'installation, le temps d'entretien spécifique au filtre est en moyenne de 2-3 heures par semaine.

Il s'agit principalement de contrôle visuel des pièces d'usure, de l'encrassement, des bourrages, de l'étanchéité du système et de l'évacuation des fines récoltées sous le filtre.

Contrôles/entretien	Fréquence	Durée	ESP	FAM
Vérification du transformateur et des isolateurs des électrodes et de frappe	Trimestriel	1 h	X	
Changement huile transformateur	Tous les 3 ans	1 jour	X	
Contrôle visuel de l'encrassement des plaques réceptrices	Chaque arrêt froid	0.5h sans nettoyage 4h avec nettoyage	X	
Contrôle de la planéité des plaques émettrices	Annuelle	1 h	X	
Contrôler l'étanchéité du transformateur HT	Annuel	2 h	X	
Vérifier le bon centrage des électrodes émissives	Annuelle	1 h	X	
Vérifier l'usure des axes des marteaux de frappe	Annuelle	1 h	X	
Entretien du compresseur : vidange et vérification	Annuelle	4 h		X
Surveillance des fuites sur le réseau d'air comprimé qui engendrent de fortes consommations d'électricité	Mensuelle	1 h		X
Analyse annuelle des manches par le fabricant	Annuelle	1 jour		X
Contrôle visuel de la chambre des gaz purs pour voir si des manches sont percées	Trimestriel	4 h		X
Contrôle du by-pass	Hebdomadaire			X
Prévoir un cycle complet de décolmatage avant arrêt chaudières pour minimiser les quantités de poussières	Annuel			X
Contrôle visuel de la chaîne d'évacuation des fines et des lieux possibles de colmatage	Journalier ou hebdomadaire	1 h	X	X
Graissage des moteurs, roulements, moto-réducteurs	Trimestriel	3 h	X	X
Contrôle visuel du remplissage de la trémie	Journalier ou hebdomadaire	1 h	X	X
Contrôler le chauffage de la trémie	Mensuel	1 h	X	X

Les tâches sont quasiment similaires pour les deux technologies, mais les conséquences d'une mauvaise exploitation seront plus lourdes pour un FAM (condensation, incendie).

L'entretien d'un ESP demande en complément une habilitation électrique haute tension.

5.3.3 P3 : GROS ENTRETIEN RENOUVELLEMENT

Le renouvellement d'un ESP est moins important que celui d'un FAM. D'ailleurs on lui imputera plus d'accidentel que de prévisionnel sur son GER spécifique. Les pièces d'usure sont essentiellement l'écluse rotative et dans une moindre mesure les marteaux de frappe et les têtes de frappe.

Pour les FAM, le poste le plus important concernant le renouvellement est de toute évidence le changement des manches et de leur support. Elles sont généralement garanties 2 à 3 ans et dans le cadre d'une utilisation adaptée, sans usure prématurée, leur remplacement intervient généralement au bout de 4 à 5 ans de fonctionnement.

Contrôles/entretien	Thème	Fréquence	Investissement	ESP	FAM
Remplacement des isolateurs	Spécifique	Tous les 4-5 ans si céramique Tous les 10 ans si Téflon	300 à 500 €	X	
Changement des plaques		Tous les 15 ans	50% du prix du filtre	X	
Tête de marteau de frappe et marteaux		Tous les 5-10 ans	3 000 à 5 000 € Ht / marteau (entre 5 à 15 marteaux par filtre)	X	
Remplacement des manches		Tous les 4-5 ans (20 000 à 25 000 h de fonctionnement)	50 à 300 € HT/manche + main d'œuvre et évacuation en CET de classe 1 des anciennes manches. Un remplacement complet peut représenter 25% du prix total du filtre.		X
Remplacement vis d'extraction	Evacuation Fine	Tous les 10 ans	3000 à 6000 €HT	X	X
Remplacement joint/pales d'étanchéité de l'écluse rotative		Tous les 5 ans	1 000 à 2 000 € HT	X	X
Remplacement roulements vis et moto réducteurs		Tous les 5 ans	200 à 500 € HT	X	X

5.4 PRINCIPAUX DYSFONCTIONNEMENTS OBSERVES

Type	Causes	Conséquences	Solutions	FAM	ESP
Incendie	Deux causes identifiées suivant les cas 1. Passage de particules incandescentes car : <ul style="list-style-type: none"> • pas de MC ou MC mal conçu • By-pass mal conçu ou défaut 2. Formation de chaux vive pendant la combustion dans les cendres et les fines et phénomène de condensation entraînant une réaction très exothermique, pouvant provoquer un incendie sur certains média non adaptés (P84) et dans les big bag	Destruction des manches par incendie et/ou par aspersion d'eau	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle des bourrages, du fonctionnement du by-pass, du MC et de la chaîne d'évacuation • Décolmatage complet avant arrêt chaudière • Adaptation de l'installation existante 	X	
Manches percées	Usure liée à l'abrasion et au décolmatage	Baisse des performances de filtration	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle visuel accru des exploitants • Décolmatage adapté 	X	
Défaut isolateurs	Tension trop élevée et création d'un arc électrique	Ionisation défectueuse	<ul style="list-style-type: none"> • Régulation de la tension 		X
Surchauffe Transformateur	Températures élevées en haut du filtre et sous les toits	Arrêt filtre	Placer le transformateur ailleurs ou assurer une bonne ventilation		X
Incendie	Fuite d'huile du transformateur	Incendie dans filtre			X
Incendie big bag	Réaction exothermique	Risque d'incendie chaufferie	Modifier la chaîne d'évacuation	X	X

Mauvaise étanchéité	Joint défectueux sur sas	Surconso élec Attise incandescentes	particules Remplacement joint écluse	X	X
Accumulation poussières en bas de trémie	Mauvaise conception (pente, système vibratil)	Risque d'incendie	Contrôle/nettoyage trémie Contrôle/nettoyage sas roue cellulaire Adaptation du système	X	X
Défaut écluse/vis	Usure matériel...	Bourrage poussières et risque de départ incendie	Dispositif de contrôle du fonctionnement	X	X

5.5 CAPACITE D'ADAPTATION AUX VARIATIONS D'EXPLOITATION

Les variations d'exploitation sur les chaudières bois en termes de taux de charge induisent des niveaux de température de fumée variable. Cette variation est à 99% du temps dans la plage de température de fonctionnement du filtre et n'a donc aucune incidence.

Cependant, il existe plusieurs cas de figures où les variations d'exploitations vont altérer le fonctionnement normal du système de filtration :

- En cas de stand-by chaudière, ou fonctionnement à faible charge (chaudière sur-dimensionnée ou production d'ECS hors saison de chauffe), les températures des fumées vont descendre si bas que le filtre sera by-passé pour des raisons de condensation.
- A l'inverse sur des chaudières sous-dimensionnés et exploitées à plus de 100% de leur charge, les températures des fumées seront trop élevées et risquent de dépasser la plage de fonctionnement du filtre ce qui nécessite l'activation du by-pass.
- un combustible inadapté (très humide, poussiéreux,...) induira un encrassement accéléré de l'échangeur chaudière et donc une élévation des températures des fumées.

Les variations d'exploitation notamment le combustible et le taux de charge sont 2 paramètres primordiaux à intégrer qui peuvent expliquer des dysfonctionnements et une baisse des performances de la filtration (activation fréquente du by-pass). Cela aura une incidence encore plus forte sur les FAM que sur les ESP car les conséquences du risque de condensation ou d'incendie sont plus dommageables sur les FAM que sur les ESP.

5.6 SERVICE APRES VENTE

De manière générale, les fournisseurs de filtre sont étrangers et n'ont pas de service technique support en France ; leur réactivité auprès des exploitants est faible, voir inexistante. Dans la majeure partie des cas, c'est le fournisseur de chaudière bois, titulaire du marché initial process bois et filtre, qui intervient au nom du fournisseur de filtre en cas de service après vente.

Le peu de maintenance à réaliser sur les filtres facilite ce principe de fonctionnement des fournisseurs avec ce réel manque de support technique. Les exploitants ont même désormais des entités internes capables d'intervenir sur ce type de matériel.

5.7 BESOINS EN FORMATION

La mise en route est réalisée par le fournisseur de filtre qui profite de cette dernière pour réaliser la formation. Dans bien des cas, les techniciens sur site ne parlent pas français ce qui ne facilite pas la formation. Encore une fois, le côté « Plug and Play » avec peu de paramétrage et de difficultés de programmation et de maintenance rend possible cette manière de procéder.

Une formation électrique haute tension est nécessaire pour l'utilisation des ESP.

On voit quand même apparaître sur les sites, une volonté des exploitants de créer un échange interne sur ces retours d'expérience afin de ne pas renouveler les mêmes erreurs.

5.8 CONTROLES REGLEMENTAIRES

D'un point de vue réglementaire, un projet d'arrêté pour les installations comprises entre 2 et 20 MW, prévoit une obligation d'analyse des émissions dans les fumées tous les 2 ans et tous les ans en zones PPA. Cependant une analyse annuelle est souvent souhaitée par le maître d'ouvrage et une analyse trimestrielle est pertinente sur des installations supérieures à 5 MW.

Le nouvel arrêté prévoit également l'obligation de réaliser des mesures en continu sur les rejets pour toutes les installations à partir de 2 MW.

Le contrôle de l'ESP ou du FAM rentre dans le périmètre du contrôle électrique obligatoire annuel.

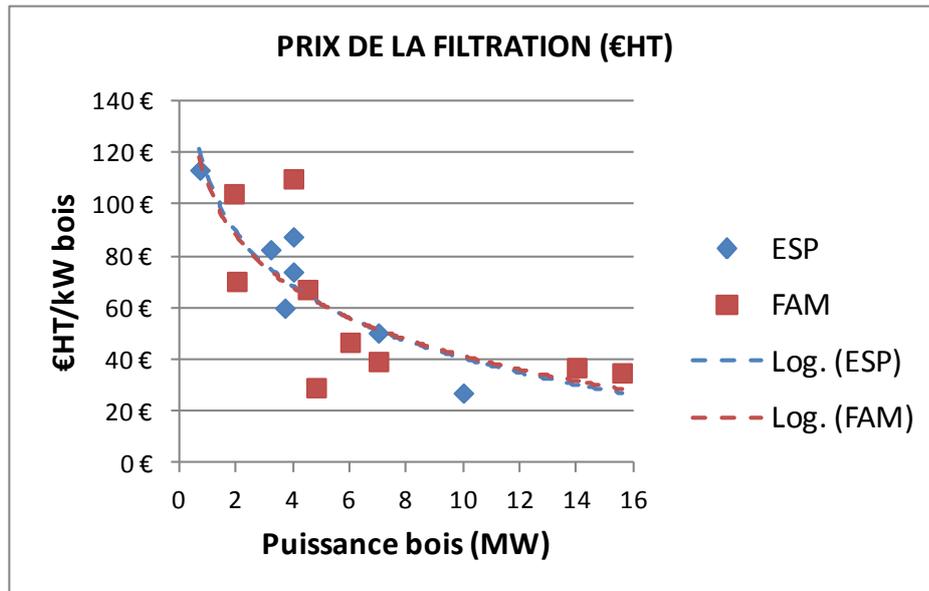
6. ANALYSE ECONOMIQUE

6.1 INVESTISSEMENT

Les coûts d'investissement liés au système de filtration sont :

- Le filtre lui-même, l'ensemble de ses auxiliaires et les plateformes d'accès nécessaires à l'entretien,
- Le surdimensionnement du ventilateur d'extraction en raison des pertes de charges supplémentaires,
- Le surcoût de génie civil lié à l'encombrement du filtre.

Les investissements ont été actualisés au 1^{er} janvier 2012.



Les courbes de tendance sont obtenues en retirant les valeurs anormalement élevées et anormalement basses.

Sur l'échantillon analysé, on constate que l'écart entre FAM et ESP est insignifiant au moins jusqu'à 10 MW. Au delà, nous ne disposons pas de données issues des visites de site pour l'ESP.

A partir des ratios de référence, nous avons pu établir les montants d'investissement moyens pour les systèmes de filtration étudiés en fonction de la puissance bois et de la VLE souhaitée :

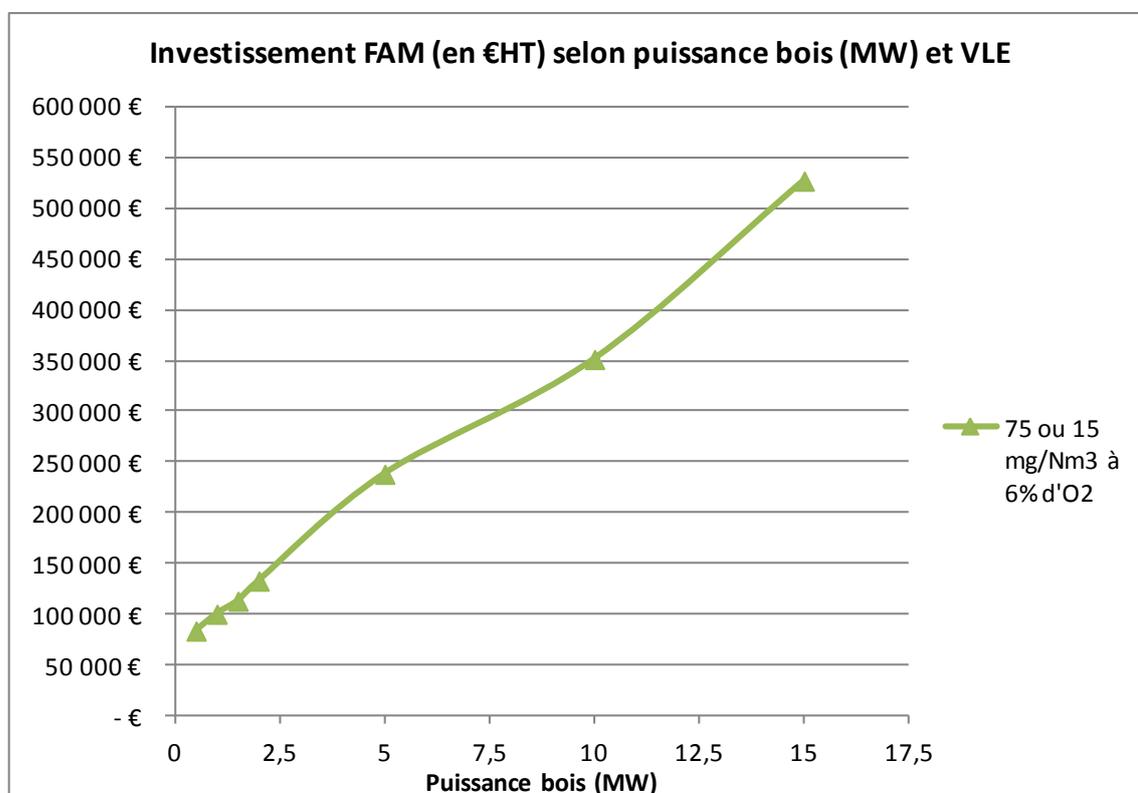
Légende

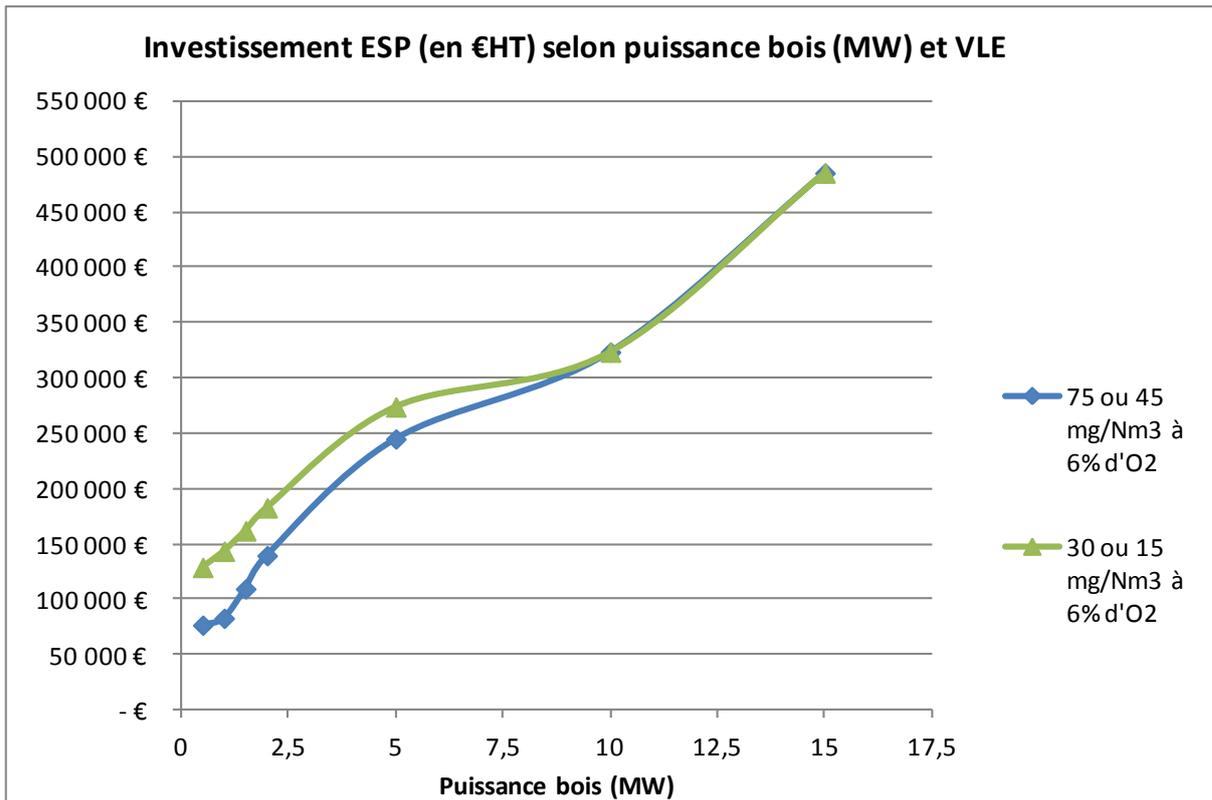
Multicyclone
 ESP
 FAM

Investissement (en €HT) suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm ³ à 6% O ₂)							
225	5 000 €	8 000 €	12 000 €	15 000 €	25 000 €	30 000 €	45 000 €
150	5 000 €	8 000 €	12 000 €	15 000 €	25 000 €	30 000 €	45 000 €
75	83 800 €	100 400 €	113 200 €	133 000 €	238 200 €	351 250 €	526 875 €
45	83 800 €	100 400 €	113 200 €	133 000 €	238 200 €	351 250 €	526 875 €
30	83 800 €	100 400 €	113 200 €	133 000 €	238 200 €	351 250 €	526 875 €
15	83 800 €	100 400 €	113 200 €	133 000 €	238 200 €	351 250 €	526 875 €

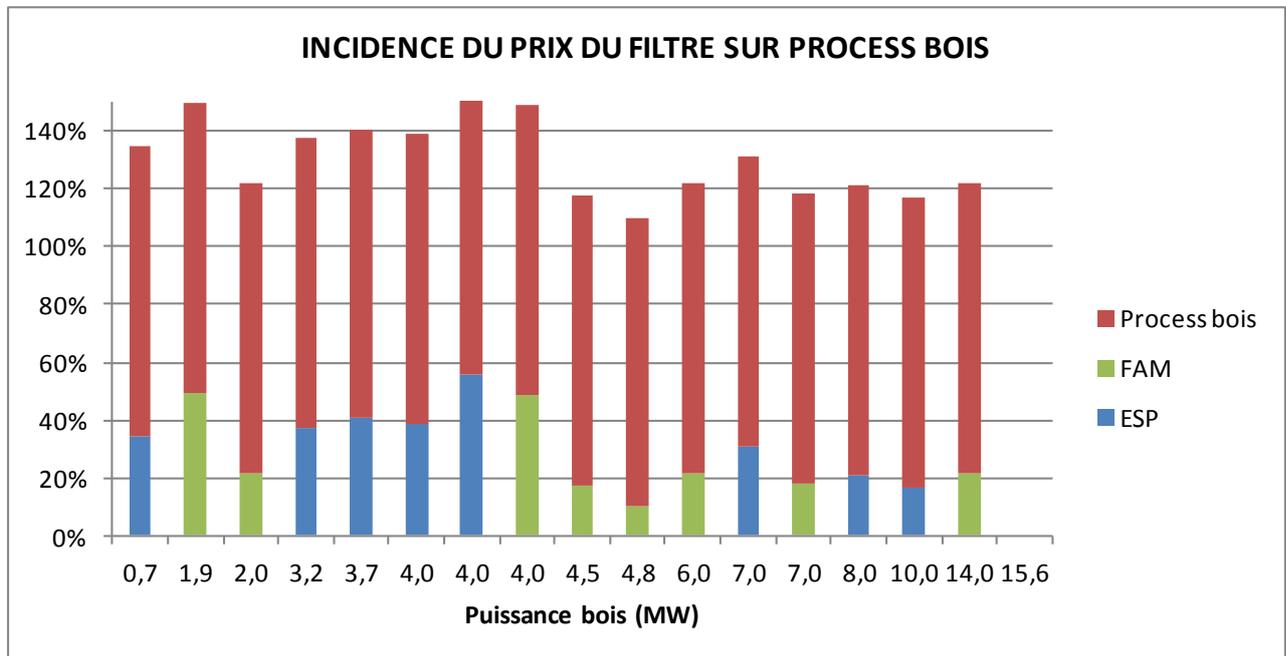
Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm ³ à 6% O ₂)							
225	5 000 €	8 000 €	12 000 €	15 000 €	25 000 €	30 000 €	45 000 €
150	5 000 €	8 000 €	12 000 €	15 000 €	25 000 €	30 000 €	45 000 €
75	76 800 €	83 000 €	109 600 €	139 600 €	245 000 €	323 500 €	485 250 €
45	76 800 €	83 000 €	109 600 €	139 600 €	245 000 €	323 500 €	485 250 €
30	129 000 €	143 600 €	162 000 €	182 800 €	274 000 €	323 500 €	485 250 €
15	129 000 €	143 600 €	162 000 €	182 800 €	274 000 €	323 500 €	485 250 €





6.2 INCIDENCE DE LA FILTRATION SUR LES INVESTISSEMENTS

6.2.1 INCIDENCE DE LA FILTRATION SUR LE PRIX DU PROCESS BOIS



En moyenne, toute technologie confondue, le prix du filtre représente **26% du prix du process bois** (comprenant la chaudière bois, le système de convoyage et d'extraction du combustible).

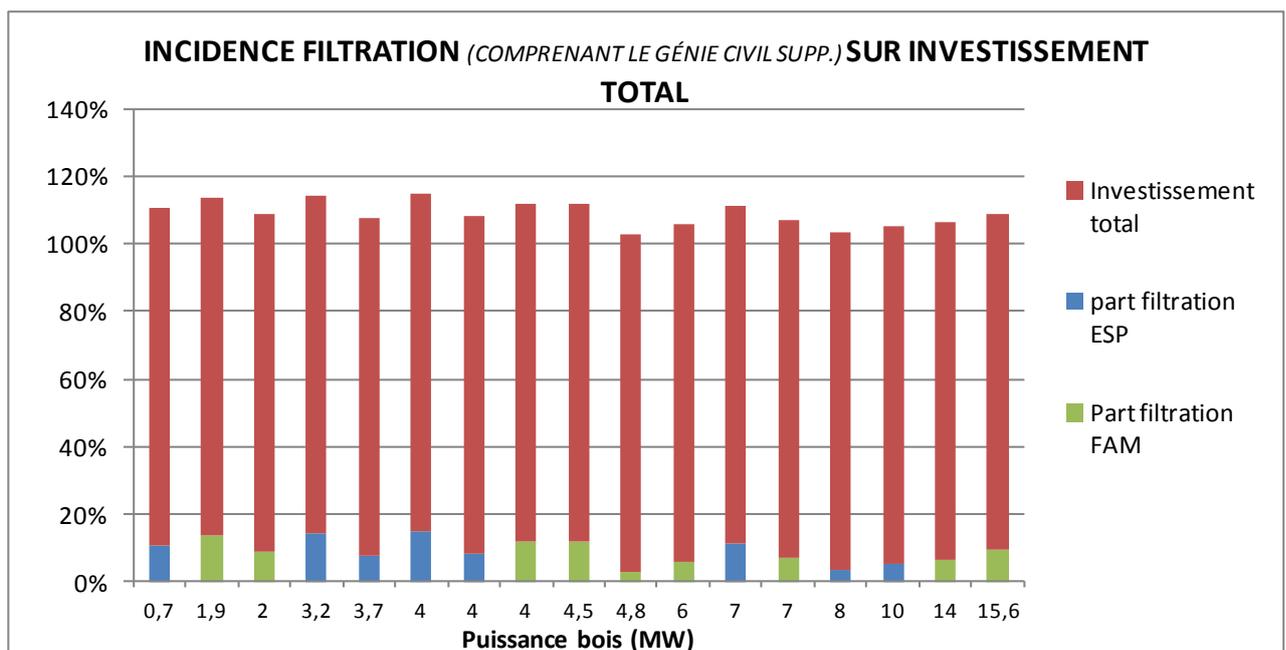
Jusqu'à 4 MW bois, le prix du filtre représente entre 30 et 50% du process bois.

A partir de 4 MW, le prix du filtre représente en moyenne 20% du process bois.

Les FAM représentent en moyenne 23% du prix du process bois.

Les ESP représentent en moyenne 29% du prix du process bois.

6.2.2 INCIDENCE DE LA FILTRATION SUR L'INVESTISSEMENT GLOBAL



En moyenne, toute technologie confondue, la part filtration (+ génie civil) représente **8% du prix global du projet** (comprenant l'ensemble chaufferie-silo, hors réseau de chaleur et sous-station).

Jusqu'à 4 MW bois, la part du filtre représente entre 10 et 20% du prix global du projet.

A partir de 4 MW, la part du filtre représente moins de 10% du prix global du projet.

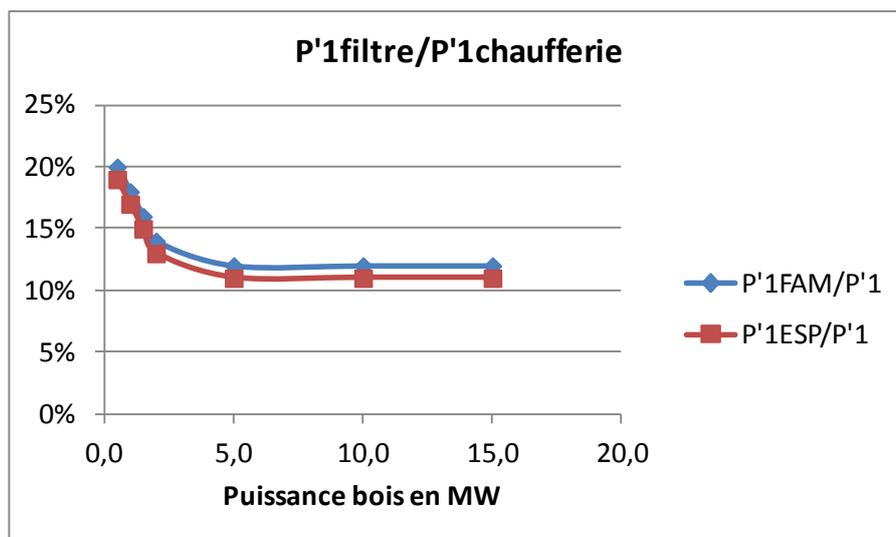
Les FAM représentent en moyenne 8% du prix global du projet.

Les ESP représentent en moyenne 9% du prix global du projet.

6.3 COUTS D'EXPLOITATION

Sur l'ensemble des sites visités, la part des consommations électriques liée au système de filtration s'élève en moyenne à **12% du P'1 chaufferie**.

Un modèle a pu être réalisé à partir des sites visités et des données collectées :



Jusqu'à 2 MW, le P'1 filtre représente 15 à 20% des consommations électriques.

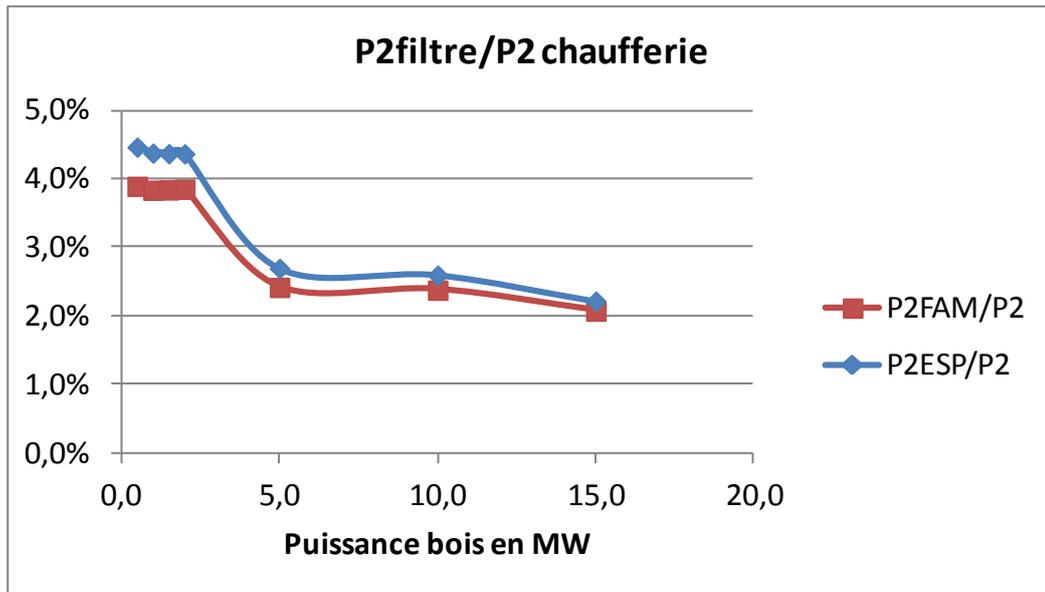
Entre 2 et 5 MW, il est entre 15 et 12%

Au-delà de 5 MW, il est aux alentours de 10%.

Le P'1 des FAM est supérieur au P'1 des ESP en raison de l'utilisation d'air comprimé pour le décolmatage et des consommations du ventilateur.

Le P2 comprend les heures d'intervention, l'évacuation des fines sous filtre et le petit matériel.

Un modèle a pu être réalisé à partir des sites visités et des données collectées :



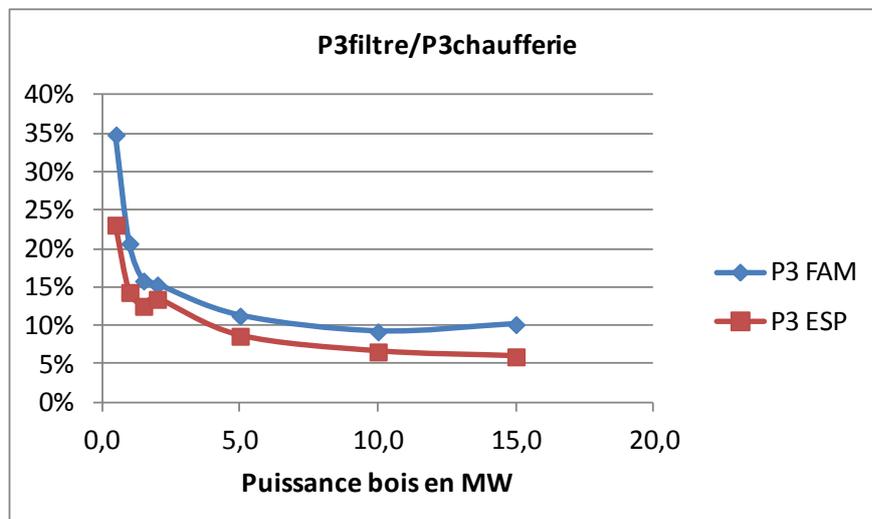
Jusqu'à 2 MW, le P2 filtre représente entre 4 et 5% du P2 total.

Au-delà de 4 MW, il est entre 2 et 3%.

Le P2 sera plus élevé pour un ESP, en raison d'intervention d'un technicien habilité haute tension.

Le P3 correspond au gros entretien et gros renouvellement de matériel, il est établi à partir d'un plan de renouvellement périodique prévisionnel.

Un modèle a pu être réalisé à partir des sites visités et des données collectées :



Pour les puissances inférieure à 1MW, le P3 du filtre peut représenter plus de 20% du P3 total.

Entre 1 et 2 MW, il représente environ 15% du P3

Au-delà de 2 MW, il représente 10% du P3, voire moins.

6.4 SYNTHÈSE DES COÛTS D'EXPLOITATION ET RATIOS

Les ratios suivants sont données en fonction de l'énergie sortie chaudière bois (P'1 et P2) ou en fonction de la puissance bois (P3)

Puissance bois (MW)	P'1 FAM	P'1 ESP	P2 FAM	P2 ESP	P3FAM	P3ESP
	€/HT/MWh	€/HT/MWh	€/HT/MWh	€/HT/MWh	€/HT/kWbois	€/HT/kWbois
0,5	0,6	0,5	0,7	0,8	4,5	3,0
1	0,5	0,5	0,6	0,7	2,7	1,9
1,5	0,5	0,4	0,5	0,6	1,9	1,5
2	0,4	0,4	0,5	0,5	1,7	1,5
5	0,3	0,3	0,3	0,3	1,1	0,9
10	0,3	0,3	0,3	0,3	0,8	0,6
15	0,3	0,3	0,2	0,2	0,8	0,5

On observe une économie d'échelle liée à la taille du projet.

A partir des ratios de référence, nous avons pu établir les coûts de fonctionnement globaux annuels moyens pour les systèmes de filtration étudiés en fonction de la puissance bois et de la VLE souhaitée pour 3 000 h de fonctionnement à pleine puissance :

Légende

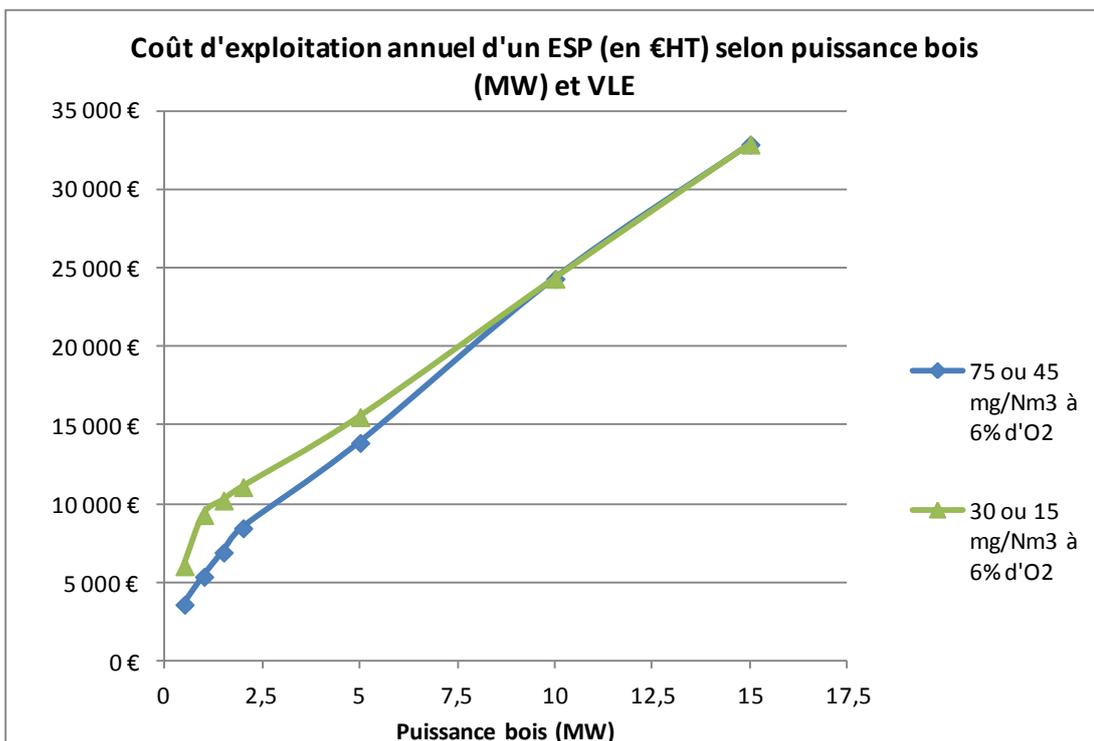
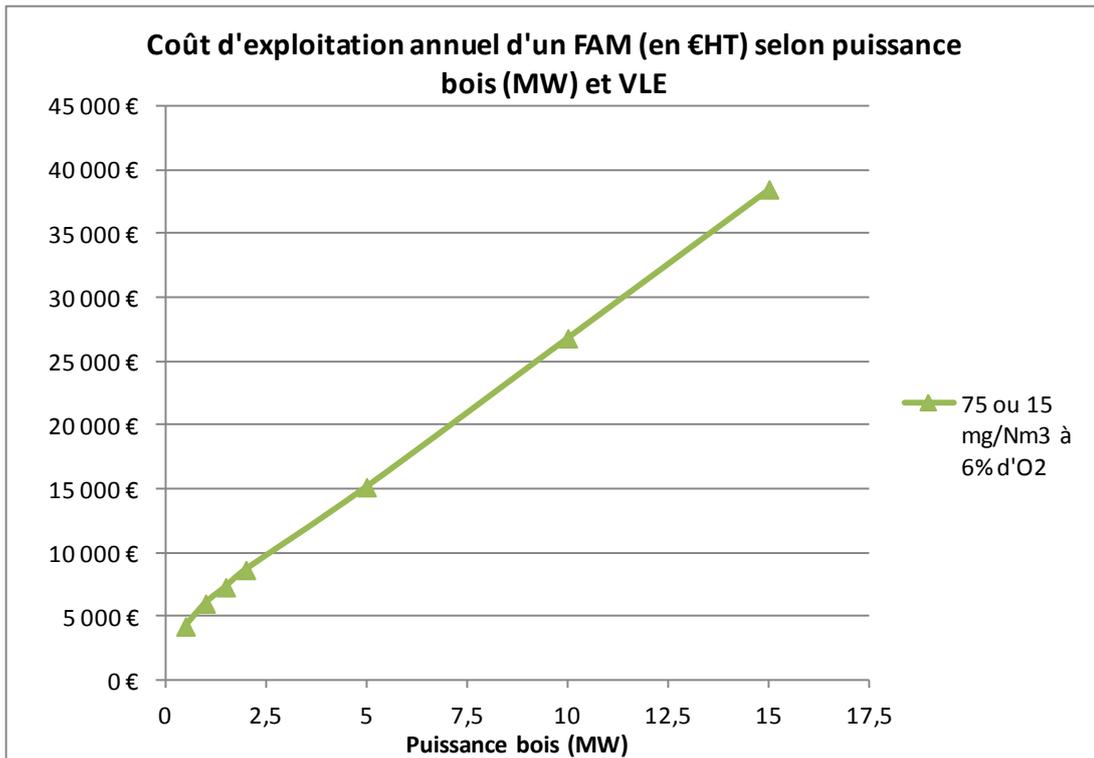
	Multicyclone
	ESP
	FAM

Coût d'exploitation (P'1-P2-P3 en €/HT/an) suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm ³ à 6% O ₂)							
225	100 €	160 €	240 €	300 €	500 €	600 €	900 €
150	100 €	160 €	240 €	300 €	500 €	600 €	900 €
75	4 251 €	6 039 €	7 325 €	8 675 €	15 163 €	26 840 €	38 509 €
45	4 251 €	6 039 €	7 325 €	8 675 €	15 163 €	26 840 €	38 509 €
30	4 251 €	6 039 €	7 325 €	8 675 €	15 163 €	26 840 €	38 509 €
15	4 251 €	6 039 €	7 325 €	8 675 €	15 163 €	26 840 €	38 509 €

Coût d'exploitation (P'1-P2-P3 en €/HT/an) suivant la puissance et le seuil de rejet

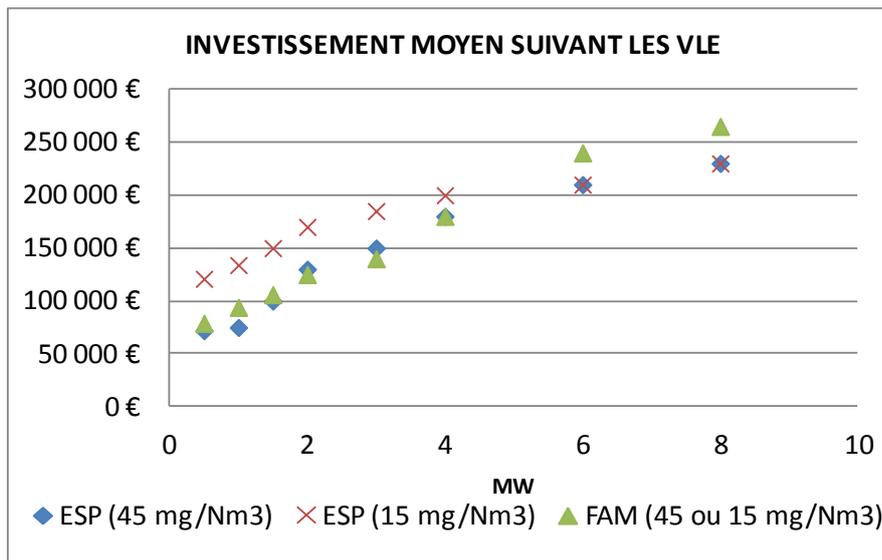
Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm ³ à 6% O ₂)							
225	100 €	160 €	240 €	300 €	500 €	600 €	900 €
150	100 €	160 €	240 €	300 €	500 €	600 €	900 €
75	3 601 €	5 375 €	6 916 €	8 458 €	13 881 €	24 315 €	32 850 €
45	3 601 €	5 375 €	6 916 €	8 458 €	13 881 €	24 315 €	32 850 €
30	6 049 €	9 299 €	10 223 €	11 076 €	15 525 €	24 315 €	32 850 €
15	6 049 €	9 299 €	10 223 €	11 076 €	15 525 €	24 315 €	32 850 €



6.5 IMPACT ECONOMIQUE D'UN ABAISSEMENT DE VLE

6.5.1 IMPACT SUR LES INVESTISSEMENTS

Ces données ont été transmises par les fabricants de filtres et fabricant de chaudières et représentent des prix marchés constatés :



Pour une VLE à 45 mg/Nm³, jusqu'à 6 MW, l'investissement est sensiblement équivalent entre un ESP et un FAM. Au delà de 6 MW, l'ESP devient moins cher (écart de 10%).

En revanche, à 15 mg/Nm³, les FAM présentent un investissement moins élevé que les ESP jusqu'à 4 MW (-20 à -30%) ; au delà les ESP restent moins chers (-10 à 15%).

Il n'y a pas d'incidence économique sur les FAM entre une VLE à 45 ou 15 mg/Nm³.

Pour les ESP, le surcoût dépend de la puissance :

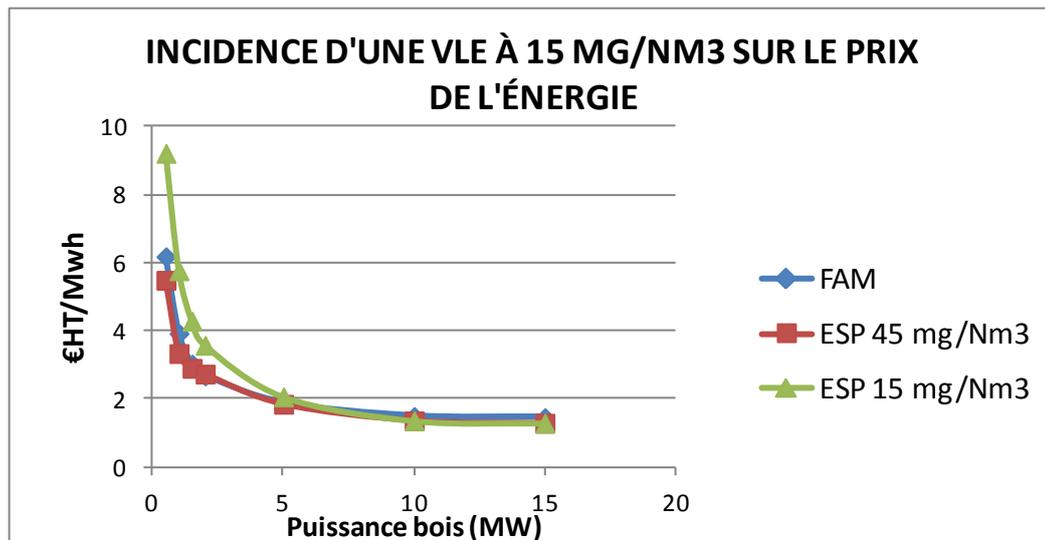
- Jusqu'à 1 MW, de l'ordre 70%,
- Entre 1 et 4 MW, le surcoût va de 10 à 30%,
- Au delà, il n'y a pas de surcoût.

6.5.2 IMPACT SUR LE PRIX DE L'ÉNERGIE

Comme nous l'avons vu précédemment, un passage de 45 à 15 mg/Nm³ nécessite un surdimensionnement de l'ESP. Cela signifie, en plus du surcoût à l'investissement, une augmentation générale des charges d'exploitation (P¹-P²-P³) et donc du prix global de l'énergie.

Ainsi pour les petites puissances (< 1MW), le surcoût d'un passage de 45 à 15 mg/Nm³ est de l'ordre de 3 à 4% (+ 2.5 à 4 €/HT/MWh).

Ensuite, jusqu'à 5 MW, le surcoût ne représente plus que 1 à 2%.



Le surcoût en coût global d'un système de filtration sur le prix de l'énergie est synthétisé par gamme de puissance et VLE dans le tableau suivant pour 3 000 h de fonctionnement à pleine puissance :

surcoût filtration			
Puissance bois (MW)	FAM	ESP 45	ESP 15
0,5	7,3%	6,5%	10,9%
1	5,3%	4,5%	7,8%
1,5	4,6%	4,4%	6,5%
2	4,6%	4,7%	6,1%
5	3,4%	3,3%	3,7%
10	2,8%	2,5%	2,5%
15	2,8%	2,5%	2,5%

Pour les petites et moyennes puissances, le passage de 45 à 15 mg/Nm3 avec ESP a une incidence économique importante. La présence d'un ESP peut alors représenter 10% du prix global de l'énergie

7. CONCLUSION

Les systèmes de filtration qui permettent d'atteindre les **Valeurs Limites d'Emission** sur les chaudières biomasse se résument aujourd'hui aux **Filtres à Manches (FAM)** et aux **Electrofiltres (ESP)**. Les solutions dites « émergentes » restent des dérivés de ces systèmes avec des changements de matériau au niveau des manches, des changements de configuration avec les électrofiltres cylindriques ou des pré-filtrations avec des cyclones performants ou même des condenseurs.

Ces deux systèmes mettent en œuvre des principes de filtration bien distincts. **La filtration d'un ESP** est considérée proportionnelle aux particules entrantes. C'est donc pour cela que les émissions garanties en sortie sont fortement dépendantes des particules qui rentrent. En d'autres termes, la filtration d'un ESP est le résultat d'une soustraction du nombre de particules entrantes dans un volume de gaz de combustion moins sa capacité à capter les particules de ce dit volume. Au contraire, **la filtration d'un FAM** a une valeur limite physique due à la maille du textile. Elle fournit donc physiquement un seuil d'émission avec une filtration qui ne dépend pas ou peu de la concentration de poussière en entrée de filtre.

Bien évidemment ces deux principes ont des conséquences différentes mais pas opposées sur la conception, sur la maintenance, le renouvellement ou l'investissement. Les visites effectuées sur les 17 sites et les entretiens d'acteurs du secteur (Fabricant de filtre, fabricant de chaudière biomasse, exploitant,...) mettent en évidence ces différences et ces similitudes.

Les deux systèmes possèdent les mêmes contraintes de mise en œuvre sur le flux des gaz de combustion avec dans les deux cas la nécessité d'utilisation d'un multicyclone pour des raisons de sécurité sur le FAM et pour des raisons de performance sur l'ESP. La conception reste similaire dans l'encombrement et la fonctionnalité avec l'utilisation d'organes communs comme le by-pass, le caisson de filtration, l'étanchéité de l'évacuation des fines, le transport des fines et son stockage. Cependant le dimensionnement reste différent avec la température en entrée de filtre qui déterminera la qualité des manches pour le FAM et la quantité de fines qui déterminera l'intensité du champ électrique et la surface de filtration pour les ESP.

Les consommations électriques de fonctionnement, contrairement aux idées reçues, restent plus importantes sur les FAM que sur les ESP avec une surconsommation considérable sur le ventilateur d'extraction due aux pertes de charges et à des fuites usuelles sur le réseau d'air comprimé. Sur un FAM bien dimensionné et une installation correctement exploitée (qualité du combustible, taux de charges de la chaudière), les consommations électriques entre les deux technologies de filtration doivent néanmoins théoriquement rester proches.

A l'exploitation, l'avis des exploitants est unanime : l'ESP requiert moins de temps que le FAM surtout en termes de renouvellement notamment celui des manches. Ajoutées à cela, les fréquences de by-pass seront plus importantes sur les FAM que sur les ESP compte tenu de la sensibilité aux risques de condensation et d'incendie. Les performances qui découlent de cette exploitation semblent différentes des caractéristiques intrinsèques des filtres. En effet, l'étude ne met pas en valeur une différence nette de résultats en termes d'émissions de poussières entre un FAM et un ESP au contraire des valeurs théoriques annoncées. On rappellera encore que les valeurs d'analyses étudiées sont ponctuelles et des valeurs moyennes amplifieraient sans doute le constat de l'influence de la qualité d'exploitation induite par une robustesse des systèmes de filtration.

Cependant, les problèmes d'incendie qu'ont connus les FAM sur les premières installations ne doivent pas être un critère de choix compte-tenu des enseignements en termes de conception mais aussi de choix de constructeur ne connaissant pas ce problème.

Simple en apparence, ces systèmes de filtration nécessitent un entretien rigoureux et des compétences techniques pour assurer des VLE terrain en concordance avec le dimensionnement. De manière générale, le système de filtration est intégré au lot de la chaudière bois, en conséquence les constructeurs de filtre sont peu présents sur les installations et le suivi est réalisé principalement par le fournisseur de chaudière bois. Les exploitants sont insuffisamment sensibilisés aux spécificités d'un système de filtration et doivent être davantage formés pour optimiser le fonctionnement de l'installation et garantir sa pérennité.

En termes d'investissement sur l'ensemble des sites visités, les deux technologies présentent des montants similaires représentant en moyenne 26% de l'investissement du process bois. Pour les puissances petites et moyennes (< 4MW),

le coût du filtre peut représenter 30 à 40% du process bois et moins de 20% pour les puissances supérieures, soit de 80 k€ (500 kW) à 500 k€ (15 MW).

Les coûts de fonctionnement des filtres en fonction des charges globales (hors achat de combustible P1) restent eux aussi similaires avec une moyenne à 6.5% sur l'ensemble des sites visités. Il existe une différence plus marquée suivant la puissance des chaudières avec une valeur entre 7 et 10% pour des chaufferies < 2 MW et seulement 5% pour des chaufferies > 5MW.

Sur le prix de vente global de l'énergie en €/HT/MWh comprenant le combustible, la maintenance, le renouvellement, et l'investissement, le poids du filtre suivant la puissance s'élève de 2.5 % à 7% pour les plus petites chaufferies, soit de 2 à 7 €/HT/MWh.

Selon les données recueillies dans cette étude, il existe plusieurs paliers de VLE qui engendrent des surcoûts (investissement et exploitation) pour une installation neuve :

- passage d'une VLE de 150 à une VLE de 75 ou 45 mg/Nm³ à 6 % d'O₂ ;
- passage d'une VLE de 45 à une VLE de 30 ou de 15 mg/Nm³ à 6 % d'O₂.

Dans le cas d'un ESP, pour un passage de 45 à 30 ou 15 mg/Nm³, le surinvestissement sera conséquent pour les petites et moyennes puissances (de l'ordre de 70 % jusqu'à 1 MW ; de 10 à 30 % jusqu'à 4 MW ; au-delà de 6 MW, le surcoût est nul).

Au vu des résultats des mesures sur sites, pour les installations existantes, la mise en œuvre d'une VLE à 30 mg/Nm³ ne devrait pas engendrer de surcoûts importants quelle que soit la technologie. En revanche, dans le cas général, le passage à 15 mg/Nm³ ne pourra pas être réalisé sans surinvestissement important.

Pour conclure, l'étude met en évidence l'importance de la qualité d'exploitation des systèmes et des mesures en continue nécessaires pour confirmer la bonne utilisation de ces filtres.

ANNEXES

Annexe 1 : Détail des coûts d'investissement et de fonctionnement des systèmes de filtration étudiés

Hypothèses :

NHFPP 3000 h

Hypothèses de calcul

Prix du bois P<2 MW :	25	€HT/MWh
Prix du bois P>2 MW :	20	€HT/MWh
Prix de l'appoint :	50	€HT/MWh
Taux de couverture bois :	85%	

Evaluation économique de la solution "multicyclone + ESP"
Légende

	Multicyclone
	ESP

Investissement (en €HT) suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm3 à 6% O2)							
225	5 000 €	8 000 €	12 000 €	15 000 €	25 000 €	30 000 €	45 000 €
150	5 000 €	8 000 €	12 000 €	15 000 €	25 000 €	30 000 €	45 000 €
75	76 800 €	83 000 €	109 600 €	139 600 €	245 000 €	323 500 €	485 250 €
45	76 800 €	83 000 €	109 600 €	139 600 €	245 000 €	323 500 €	485 250 €
30	129 000 €	143 600 €	162 000 €	182 800 €	274 000 €	323 500 €	485 250 €
15	129 000 €	143 600 €	162 000 €	182 800 €	274 000 €	323 500 €	485 250 €

Coût d'exploitation (P'1-P2-P3 en €HT/an) suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm3 à 6% O2)							
225	100 €	160 €	240 €	300 €	500 €	600 €	900 €
150	100 €	160 €	240 €	300 €	500 €	600 €	900 €
75	3 299 €	4 835 €	6 201 €	7 632 €	12 134 €	20 820 €	27 607 €
45	3 299 €	4 835 €	6 201 €	7 632 €	12 134 €	20 820 €	27 607 €
30	5 542 €	8 365 €	9 166 €	9 994 €	13 570 €	20 820 €	27 607 €
15	5 542 €	8 365 €	9 166 €	9 994 €	13 570 €	20 820 €	27 607 €

Coût global (P'1-P2-P3-P4 en €HT/an) suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm3 à 6% O2)							
225	501 €	802 €	1 203 €	1 504 €	2 506 €	3 007 €	4 511 €
150	501 €	802 €	1 203 €	1 504 €	2 506 €	3 007 €	4 511 €
75	9 462 €	11 495 €	14 996 €	18 834 €	31 793 €	46 778 €	66 545 €
45	9 462 €	11 495 €	14 996 €	18 834 €	31 793 €	46 778 €	66 545 €
30	15 893 €	19 888 €	22 166 €	24 662 €	35 557 €	46 778 €	66 545 €
15	15 893 €	19 888 €	22 166 €	24 662 €	35 557 €	46 778 €	66 545 €

Surcoût global d'un système de filtration (en €HT/MWh utile fourni) sur le prix de l'énergie suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm3 à 6% O2)							
225							
150							
75	5,5 €	3,3 €	2,9 €	2,7 €	1,8 €	1,4 €	1,3 €
45	5,5 €	3,3 €	2,9 €	2,7 €	1,8 €	1,4 €	1,3 €
30	9,2 €	5,8 €	4,3 €	3,6 €	2,1 €	1,4 €	1,3 €
15	9,2 €	5,8 €	4,3 €	3,6 €	2,1 €	1,4 €	1,3 €

Surcoût global (%) sur le prix de l'énergie suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm3 à 6% O2)							
225							
150							
75	6,5%	4,5%	4,4%	4,7%	3,3%	2,5%	2,5%
45	6,5%	4,5%	4,4%	4,7%	3,3%	2,5%	2,5%
30	10,9%	7,8%	6,5%	6,1%	3,7%	2,5%	2,5%
15	10,9%	7,8%	6,5%	6,1%	3,7%	2,5%	2,5%

Evaluation économique de la solution "multicyclone + FAM"
Légende

Investissement (en €HT) suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm3 à 6% O2)							
225	5 000 €	8 000 €	12 000 €	15 000 €	25 000 €	30 000 €	45 000 €
150	5 000 €	8 000 €	12 000 €	15 000 €	25 000 €	30 000 €	45 000 €
75	83 800 €	100 400 €	113 200 €	133 000 €	238 200 €	351 250 €	526 875 €
45	83 800 €	100 400 €	113 200 €	133 000 €	238 200 €	351 250 €	526 875 €
30	83 800 €	100 400 €	113 200 €	133 000 €	238 200 €	351 250 €	526 875 €
15	83 800 €	100 400 €	113 200 €	133 000 €	238 200 €	351 250 €	526 875 €

Coût d'exploitation (P'1-P2-P3 en €HT/an) suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm3 à 6% O2)							
225	100 €	160 €	240 €	300 €	500 €	600 €	900 €
150	100 €	160 €	240 €	300 €	500 €	600 €	900 €
75	3 933 €	5 467 €	6 562 €	7 785 €	13 256 €	23 027 €	32 789 €
45	3 933 €	5 467 €	6 562 €	7 785 €	13 256 €	23 027 €	32 789 €
30	3 933 €	5 467 €	6 562 €	7 785 €	13 256 €	23 027 €	32 789 €
15	3 933 €	5 467 €	6 562 €	7 785 €	13 256 €	23 027 €	32 789 €

Coût global (P'1-P2-P3-P4 en €HT/an) suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm3 à 6% O2)							
225	501 €	802 €	1 203 €	1 504 €	2 506 €	3 007 €	4 511 €
150	501 €	802 €	1 203 €	1 504 €	2 506 €	3 007 €	4 511 €
75	10 657 €	13 524 €	15 646 €	18 458 €	32 370 €	51 212 €	75 067 €
45	10 657 €	13 524 €	15 646 €	18 458 €	32 370 €	51 212 €	75 067 €
30	10 657 €	13 524 €	15 646 €	18 458 €	32 370 €	51 212 €	75 067 €
15	10 657 €	13 524 €	15 646 €	18 458 €	32 370 €	51 212 €	75 067 €

Surcoût global d'un système de filtration (en €HT/MWh utile fourni) sur le prix de l'énergie suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm3 à 6% O2)							
225							
150							
75	6,2 €	3,9 €	3,0 €	2,7 €	1,9 €	1,5 €	1,5 €
45	6,2 €	3,9 €	3,0 €	2,7 €	1,9 €	1,5 €	1,5 €
30	6,2 €	3,9 €	3,0 €	2,7 €	1,9 €	1,5 €	1,5 €
15	6,2 €	3,9 €	3,0 €	2,7 €	1,9 €	1,5 €	1,5 €

Surcoût global (%) sur le prix de l'énergie suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm3 à 6% O2)							
225							
150							
75	7,3%	5,3%	4,6%	4,6%	3,4%	2,8%	2,8%
45	7,3%	5,3%	4,6%	4,6%	3,4%	2,8%	2,8%
30	7,3%	5,3%	4,6%	4,6%	3,4%	2,8%	2,8%
15	7,3%	5,3%	4,6%	4,6%	3,4%	2,8%	2,8%

Grille de comparaison des différentes technologies

Légende

	Multicyclone
	ESP
	FAM

Investissement (en €HT) suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm ³ à 6% O ₂)							
225	5 000 €	8 000 €	12 000 €	15 000 €	25 000 €	30 000 €	45 000 €
150	5 000 €	8 000 €	12 000 €	15 000 €	25 000 €	30 000 €	45 000 €
75	76 800 €	83 000 €	109 600 €	133 000 €	238 200 €	323 500 €	485 250 €
45	76 800 €	83 000 €	109 600 €	133 000 €	238 200 €	323 500 €	485 250 €
30	83 800 €	100 400 €	113 200 €	133 000 €	238 200 €	323 500 €	485 250 €
15	83 800 €	100 400 €	113 200 €	133 000 €	238 200 €	323 500 €	485 250 €

Coût d'exploitation (P'1-P2-P3 en €HT/an) suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm ³ à 6% O ₂)							
225	100 €	160 €	240 €	300 €	500 €	600 €	900 €
150	100 €	160 €	240 €	300 €	500 €	600 €	900 €
75	3 299 €	4 835 €	6 201 €	7 632 €	12 134 €	20 820 €	27 607 €
45	3 299 €	4 835 €	6 201 €	7 632 €	12 134 €	20 820 €	27 607 €
30	3 933 €	5 467 €	6 562 €	7 785 €	13 256 €	20 820 €	27 607 €
15	3 933 €	5 467 €	6 562 €	7 785 €	13 256 €	20 820 €	27 607 €

Coût global (P'1-P2-P3-P4 en €HT/an) suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm ³ à 6% O ₂)							
225	501 €	802 €	1 203 €	1 504 €	2 506 €	3 007 €	4 511 €
150	501 €	802 €	1 203 €	1 504 €	2 506 €	3 007 €	4 511 €
75	9 462 €	11 495 €	14 996 €	18 458 €	31 793 €	46 778 €	66 545 €
45	9 462 €	11 495 €	14 996 €	18 458 €	31 793 €	46 778 €	66 545 €
30	10 657 €	13 524 €	15 646 €	18 458 €	32 370 €	46 778 €	66 545 €
15	10 657 €	13 524 €	15 646 €	18 458 €	32 370 €	46 778 €	66 545 €

Surcoût global d'un système de filtration (en €HT/MWh utile fourni) sur le prix de l'énergie suivant la puissance et le seuil de rejet

Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm ³ à 6% O ₂)							
225							
150							
75	5,5 €	3,3 €	2,9 €	2,7 €	1,8 €	1,4 €	1,3 €
45	5,5 €	3,3 €	2,9 €	2,7 €	1,8 €	1,4 €	1,3 €
30	6,2 €	3,9 €	3,0 €	2,7 €	1,9 €	1,4 €	1,3 €
15	6,2 €	3,9 €	3,0 €	2,7 €	1,9 €	1,4 €	1,3 €

Surcoût global (%) sur le prix de l'énergie suivant la puissance et le seuil de rejet

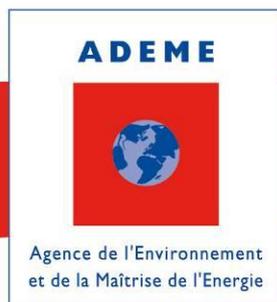
Puissance utile bois (MW)	0,5	1	1,5	2	5	10	15
VLE (mg/Nm ³ à 6% O ₂)							
225							
150							
75	6,5%	4,5%	4,4%	4,6%	3,3%	2,5%	2,5%
45	6,5%	4,5%	4,4%	4,6%	3,3%	2,5%	2,5%
30	7,3%	5,3%	4,6%	4,6%	3,4%	2,5%	2,5%
15	7,3%	5,3%	4,6%	4,6%	3,4%	2,5%	2,5%

Pour chaque puissance et VLE, la couleur indique la technologie de filtration la moins onéreuse.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : 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.

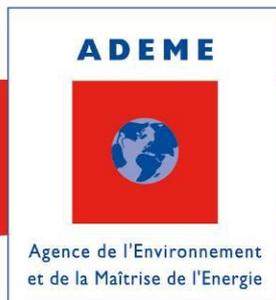


ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry for Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing, the Ministry for Higher Education and Research, and the Ministry for Economy, Finance and Industry. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development.

ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr