

NOTE DE SYNTHÈSE
N° DRC-17-164787-10342A

04/05/2018

**Synthèse des études à l'émission réalisées par
l'INERIS sur la combustion du bois en foyers
domestiques.**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

SYNTHESE DES ETUDES A L'EMISSION REALISEES PAR L'INERIS SUR LA COMBUSTION DU BOIS EN FOYERS DOMESTIQUES

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire

Liste des personnes ayant participé à l'étude :
Serge Collet, Isaline Fraboulet, Jean Poulleau

PRÉAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

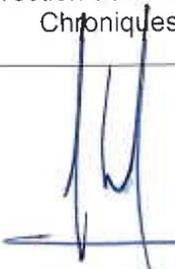
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Serge COLLET, Isaline FRABOULET, Jean POULLEAU	Marc DURIF	Philippe HUBERT
Qualité	Ingénieurs à l'Unité « Caractérisation des EMISSions atmosphériques et aqueuses » Direction des Risques Chroniques	Responsable de Pôle « Caractérisation de l'Environnement » Direction des Risques Chroniques	Directeur des Risques Chroniques
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. RESUME	7
1.1. Préambule.....	7
1.2. Bilan des connaissances.....	8
1.3. Voies d'amélioration.....	12
1.4. Perspectives.....	13
2. GLOSSAIRE	14
2.1. Paramètres.....	14
2.2. Méthodes de mesurage.....	14
3. LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES	15
4. INTRODUCTION	16
5. QUE FAUT-IL MESURER A L'EMISSION	17
5.1. Physico-chimie de la combustion de biomasse : Généralités sur les particules primaires et secondaires.....	17
5.1.1. Particules primaires.....	17
5.1.2. Mécanismes de (trans-)formation des aérosols issus de la combustion de biomasse.....	19
6. QUELLE METHODE DE MESURAGE DES PARTICULES UTILISER ET COMMENT AMELIORER LA FIABILITE DES RESULTATS OBTENUS ?	22
6.1. Les méthodes standard nationales de mesurage des émissions particulières.....	22
6.2. Les résultats obtenus par les différentes méthodes sont-ils corrélés ?.....	25
6.3. Homogénéisation des pratiques.....	26
6.4. Perspectives : Quelle méthode de mesurage préconiser pour déterminer les performances des appareils ou établir des facteurs d'émission ?.....	26
6.4.1. Evaluation de la performance des appareils.....	27
6.4.2. Détermination des facteurs d'émission.....	27
6.5. Perspectives : Vers un protocole européen prenant en compte les aérosols organiques secondaires ?.....	28
7. CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT ET PERFORMANCES	28
7.1. Représentativité des protocoles de caractérisation des émissions et du rendement.....	28
7.2. Influence des conditions de fonctionnement des appareils sur les émissions de polluants et les rendements.....	31
8. COMMENT REDUIRE LES EMISSIONS POLLUANTES ?	32
8.1. L'amélioration des rendements énergétiques.....	32
8.2. La réduction des émissions à la source :.....	32

8.2.1. Les appareils à combustion catalytique	33
8.2.2. Les appareils à combustion avancée	33
8.2.3. Les poêles de masse ou à accumulation lente de chaleur	34
8.2.4. Les poêles à granulés.....	35
8.2.5. Les chaudières domestiques	35
8.3. Les techniques de réduction des émissions à installer sur les appareils existant (Peren2Bois, 2012, ERFI, 2017).....	35
8.4. Une installation, un entretien et une utilisation correcte	38
9. IMPACT DES POINTS PRECEDENTS ET PROSPECTIVES	40
9.1. Robustesse des facteurs d'émission	40
9.2. Quels niveaux de performances pour les futurs appareils.....	41
10. QUEL IMPACT SUR LES EMISSIONS D'UN RENOUVELLEMENT DU PARC ?	42
10.1. Remplacement des foyers ouverts	42
10.2. Remplacement des foyers fermés anciens	42
11. PART ATTRIBUABLE AU AU CHAUFFAGE AU BOIS DANS LA POLLUTION AUX PARTICULES FINES : QUELS MARQUEURS UTILISER ?	43
11.1. Marqueurs particuliers	43
11.2. Marqueurs gazeux.....	44
12. QUEL IMPACT DU CHAUFFAGE AU BOIS SUR LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR ?.....	45
13. CONCLUSIONS	47
14. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	51
15. ANNEXES.....	53

1. RESUME

1.1. PREAMBULE

Pour faire face aux enjeux climatiques, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015 prévoit de porter la part des énergies renouvelables à 23% de la consommation finale brute d'énergie en 2020 et à 32% en 2030. Le bois énergie est la première source d'énergie renouvelable (chaleur et électricité) utilisée en France, et la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit une contribution croissante pour la production électrique puisqu'elle doit passer de moins de 300 MW à fin 2014 à plus de 800 MW en fin 2023 (c'est-à-dire l'équivalent d'une croissance en équivalent production annuelle de 230 kTEP à 620 kTEP) et une croissance en proportion plus faible pour la production de chaleur (de 10 600 kTEP en 2013 à environ 13 500 kTEP en 2023).

Tout l'enjeu est que ce développement utile à la lutte contre le changement climatique ait le moins possible d'impact sur la qualité de l'air et se fasse dans le respect des directives européennes de qualité de l'air qui fixent des seuils de concentrations maximales pour certains polluants. La combustion du bois est en effet à l'origine d'émissions de polluants ; particulièrement dans le cas d'appareils domestiques où la combustion peut s'avérer incomplète à certaines allures. Ces émissions ont un impact sur la qualité de l'air extérieur moyenne et la qualité de l'air intérieur (non spécifiquement traitée dans ce document). Elles peuvent par ailleurs, à certaines périodes de l'année et dans certaines zones, contribuer significativement aux épisodes de pollution atmosphérique. Actuellement, la France est en situation de contentieux avec la Commission européenne pour non-respect des niveaux de particules fines (PM₁₀) dans l'air de nos grandes villes ou vallées alpines. Or l'amélioration de la qualité de l'air est un enjeu majeur pour la santé humaine. Le décret du 10 mai 2017 et l'arrêté du 11 mai 2017 qui composent le Plan National de Réduction des Emissions de Polluants Atmosphériques (PREPA) fixe ainsi des objectifs de réduction des émissions de PM_{2,5}, SO₂, NO_x, NH₃ et COVNM à horizon 2020, 2025 et 2030 pour les quatre principaux secteurs émetteurs que sont les transports, le résidentiel-tertiaire, l'industrie et l'agriculture et détermine des actions de réduction à renforcer et mettre en œuvre.

Les données du Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA SECTEN 2015), indiquent que la combustion de bois dans les foyers domestiques (chaudières, inserts, foyers fermés et ouverts, cuisinières, etc) contribue pour une large part en France aux émissions annuelles nationales d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) à hauteur de 59%, de benzène pour 58% et de particules fines primaires (PM_{2,5}) pour 44%.

Il est donc important pour l'avenir de la filière bois-énergie de limiter et réduire l'impact du parc domestique sur la qualité de l'air, notamment sur les niveaux de concentration en particules dans l'atmosphère.

1.2. BILAN DES CONNAISSANCES

Les particules issues, plus ou moins directement, des processus de combustion domestique de bois peuvent être divisées en deux catégories : primaires et secondaires.

- Les particules primaires présentent une fraction solide et par convention une fraction dite condensable.
- Les particules secondaires se forment dans l'atmosphère après émission par des phénomènes de photooxydation, principalement à partir des précurseurs gazeux (composés organiques semi-volatils et volatils) les plus réactifs.

Les particules présentes à l'état solide dans le conduit se forment principalement dans les zones les plus froides de la chambre de combustion et contiennent notamment du carbone organique (OC) et du carbone élémentaire (EC ou BC). La fraction condensable est constituée d'espèces semi-volatiles organiques (COSV) dont le poids moléculaire est élevé et qui, par refroidissement hors du conduit forment des particules par condensation. Cette condensation des composés organiques semi-volatils sur les particules préexistantes a lieu très rapidement, immédiatement après rejet dans l'air ambiant (Champrobois, 2014). La concentration de la fraction solide peut être quantifiée par simple collecte sur un filtre chauffé, alors que la quantification de la concentration de la fraction condensable requiert l'utilisation d'une méthode par piégeage dans un liquide approprié refroidi (méthode à barbotage) ou sur filtre après dilution des gaz (méthode du tunnel à dilution).

Dans le cas de la combustion du bois, l'aérosol secondaire est très majoritairement de nature organique (aérosol organique secondaire ou AOS). La formation et l'évolution dans l'atmosphère des composés secondaires issus des précurseurs organiques émis par la combustion du bois sont encore assez mal connues alors que cet AOS peut contribuer de façon importante à la pollution particulaire. Il n'existe à ce jour pas de méthode normalisée permettant de caractériser le potentiel de formation d'AOS d'une source.

Réduire la contribution de la filière combustion domestique de biomasse aux concentrations de particules dans l'air ambiant n'implique donc pas uniquement de réduire les émissions de particules solides, mais aussi et surtout celles de la fraction condensable ; et des COV incluant le benzène. La fraction condensable comprend les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs) dont le benzo(a)pyrène (BaP), alors que parmi les COV figure le benzène. Une telle réduction, permettra un co-bénéfice sur les niveaux d'émission de ces composés qui sont des polluants en tant que tel et qui font également l'objet à ce titre d'objectifs de réduction et d'une surveillance dans l'air ambiant conformément aux directives 2004/107/CE et 2000/69/CE.

Sur un cycle complet, environ 80% des émissions polluantes ont lieu durant les 10 à 15 minutes après l'allumage à froid de la première charge bois ou à chaud des charges bois suivantes (rechargement).

Réduire ce pic de pollution pourrait donc conduire à une réduction drastique des émissions polluantes.

L'amélioration des conditions de combustion intervient sur les émissions de la fraction solide mais surtout sur les émissions de la fraction organique condensable et des COV.

Ceci explique la quasi-inexistence de ceux-ci sur des installations de plus fortes puissances où les temps de séjour des gaz et particules sont plus conséquents et les niveaux de température plus élevés.

L'influence des paramètres de fonctionnement sur la qualité de la combustion et les émissions polluantes des appareils a fait l'objet d'une étude bibliographique récente (rapport INERIS DRC-17-164787-08043A) basée sur l'analyse d'une quinzaine de travaux expérimentaux de l'INERIS et d'autres organismes.

Elle a permis de dégager des tendances sur les facteurs d'influence des émissions et les écarts pouvant être observés sur les performances environnementales et énergétiques des appareils selon les conditions réalisation des tests.

- Les principaux facteurs ayant une influence sur les performances environnementales et énergétiques des appareils sont :
 - L'humidité du bois : comprise entre 12 et 25% voire plus ; au-delà de 25%, une augmentation des émissions et une diminution du rendement et de la puissance délivrée sont observés,
 - L'essence de bois (émissions en général plus fortes lors de la combustion de chêne ou de résineux que de charme ou de hêtre),
 - L'allure de fonctionnement de l'appareil, l'utilisateur étant souvent amené à faire fonctionner son appareil à allure réduite (en limitant les entrées d'air comburant) : car son besoin en chauffage ne correspond pas en continu à la puissance nominale délivrée par l'appareil, si celui-ci a été dimensionné pour subvenir à des épisodes de grand froid, pour compenser un tirage trop élevé de son installation, si l'utilisateur n'est pas physiquement présent pour recharger le foyer (cas des fonctionnements nocturnes par exemple),
 - La charge, et la qualité de bois utilisée qui peuvent être variables (dimension, diamètre, humidité des bûches, essences de bois, quantité d'écorce, etc.)
 - Le tirage qui varie de façon importante d'un logement à l'autre en fonction de la hauteur du conduit et de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur. Un tirage important n'est pas particulièrement défavorable mais peut provoquer une combustion plus rapide avec des temps de séjour insuffisants pour assurer une combustion achevée qui peut amener l'utilisateur à faire fonctionner son appareil à allure réduite. Le tirage varie en fonction de l'avancement de la combustion.
 - Le vieillissement des appareils : au cours du temps, une usure des joints et des déformations du foyer peuvent avoir lieu, et engendrer des entrées d'air parasites.

A noter que l'action simultanée de plusieurs facteurs dégradant la qualité de la combustion donne lieu à des émissions de polluants supplémentaires par rapport à celles dues à l'impact additionné de ces facteurs pris séparément.

- Les tests menés selon les normes en vigueur pour évaluer les performances énergétiques et environnementales des appareils sont effectués uniquement dans des conditions de référence bien particulières. Ces conditions nominales sont souvent relativement éloignées des conditions réelles de fonctionnement décrites ci-dessus. La réalisation de tests dans ces conditions de fonctionnement conduirait d'après les études AFAC, 2015 et Bereal 2017 :

- à sous-estimer fortement les émissions réelles de polluants qui sont principalement émis lors de phases exclues de ces tests (CO et COV émis en grande quantité lors de l'allumage et lors du régime de braises, et de PM émises essentiellement lors de l'allumage). L'application d'un protocole plus réaliste (prise en compte de l'intégralité de la combustion, allumage à froid et régime de braises compris) conduirait par exemple à une augmentation de 260% à 370% des émissions de CO, de 410% des émissions de COV et de 300% à 500% des émissions de la fraction solide des particules par rapport à l'application du protocole normalisé.
- à surestimer le rendement énergétique, de 5 à 16 points.

Aucune méthode normalisée de mesurage des émissions de particules ne bénéficie d'un consensus au niveau Européen.

La Directive Ecoconception, fait référence à quatre méthodes de mesurage : la méthode du filtre chauffé (SP), deux variantes de la méthode du tunnel à dilution (DT), et une méthode basée sur l'utilisation d'un électrofiltre ; avec des valeurs limites distinctes selon les méthodes utilisées.

Toutes ces méthodes permettent de mesurer la fraction solide de l'aérosol, mais seules les méthodes du tunnel à dilution (DT) et à barbotage (SPC) permettent de prendre en compte la fraction condensable de l'aérosol, de manière analogue. La méthode du prélèvement sur filtre chauffé (SP) et celle du prélèvement dans un tunnel à dilution (DT) sont les plus majoritairement utilisées par les laboratoires notifiés pour la réalisation des essais de conformité des appareils dans le cadre de l'obligation du marquage CE, et ont été sélectionnées dans le projet de norme Pr EN 16510 en cours de publication. Enfin, une méthode a été proposée suite aux travaux du projet EN_PME_TEST, basée sur la méthode du filtre chauffé (SP), combinée au mesurage des COVT avec un détecteur à ionisation de flamme (FID), qui donne un bon indicateur de la fraction condensable. Cette méthode combinée pourrait, sous deux à trois ans se substituer aux deux méthodes présentées dans la PrEN 16510.

Quatre voies sont possibles pour réduire les émissions de polluants :

- l'amélioration de l'efficacité énergétique. Elle permet de diminuer les consommations de bois de façon significative ; les émissions pour un même besoin en chauffage sont donc moins importantes,
- la réduction des émissions à la source ou réduction primaire qui consistent à améliorer les performances environnementales (qualité de la combustion) des appareils,
- l'installation de dispositifs sur les appareils existant, permettant de réduire les émissions de polluants,
- l'installation, l'entretien et l'utilisation de l'appareil.

Un certain nombre de technologies permettent d'obtenir des performances énergétiques élevées tout en minimisant les émissions polluantes. Il s'agit :

- des appareils à combustion catalytique (peu utilisés en Europe), ils permettent une oxydation catalytique d'un certain nombre de composés dont le monoxyde de carbone et les composés organiques constituant la fraction condensable des particules.
- des appareils à combustion avancée (non catalytique) : appareils conçus de manière empirique à partir de l'expérience de chaque constructeur. En France, la répartition des débits d'air primaire, secondaire et air de vitre, ainsi

que le positionnement de ces entrées d'air sont définis moyennant la réalisation d'essais permettant d'orienter les choix et de positionner les performances du nouvel appareil par rapport aux exigences du label Flamme Verte.

- des poêles de masse, ces poêles sont conçus pour emmagasiner l'énergie produite lors de la combustion et pour restituer lentement la chaleur dans la pièce à chauffer, jusqu'à 24 h après la fin de la combustion. Bien conçus et du fait de leur grande capacité à restituer la chaleur, ces poêles fonctionnent en général peu de temps par jour, essentiellement à allure nominale.
- des poêles à granulés, ces équipements sont parmi les plus performants du marché, tant sur le plan énergétique qu'environnemental. Ces appareils permettent d'obtenir des rendements élevés (environ 90%) grâce à un bon mélange et un ratio air comburant et combustible, la faible taille des granulés favorisant le passage de l'air, et d'une alimentation automatique en combustible. Les performances des poêles à granulés constatées sont en général élevées mais restent très disparates d'un appareil à l'autre en fonction de leur conception, et surtout à faible allure (BeReal, 2016).
- des chaudières domestiques. Quelles que soient les chaudières : à granulés, à bûches ou à plaquettes, ces installations se caractérisent par de meilleures performances énergétiques et environnementales que les appareils précédents. Lorsqu'elles sont associées à un ballon d'eau chaude tampon, la chaudière fonctionne essentiellement à allure nominale, La fraction condensable des particules à l'émission des chaudières est en général très faible (de l'ordre de quelques mg/m^3_0).

En France, mais également à l'étranger comme par exemple en Norvège, l'amélioration des performances des appareils neufs s'avère lente (réduction des émissions de particules de l'ordre de 2,5% par an lors des quinze dernières années). Le bénéfice de l'amélioration des performances des appareils neufs sur la qualité de l'air pourrait par ailleurs être amoindri, du moins en partie, par la dégradation dans le temps des performances de ces appareils, du fait de leur vieillissement et de leur longévité.

Or, des performances plus élevées pourraient être atteintes rapidement :

- en restreignant le domaine d'utilisation des appareils de façon à éviter des allures très réduites (combustion en défaut d'air conduisant à des phases très émissives).
- en améliorant la conception des appareils. L'objectif étant d'obtenir dans la phase de démarrage une combustion progressive en amenant l'excès d'air juste nécessaire pour assurer l'oxydation complète sans pour autant refroidir les gaz. La gestion des entrées d'air est donc primordiale afin d'éviter le pic d'émission de polluants lors de l'allumage, les particules totales étant essentiellement émises lors de cette phase. Pour cela, un minimum de régulation des entrées d'air notamment en tout début de combustion est probablement nécessaire.
- enfin, même sur des appareils performants, de forts niveaux d'émission peuvent être observés si ceux-ci sont utilisés dans de mauvaises conditions. Une autre voie possible pour réduire les émissions polluantes serait donc de favoriser l'utilisation d'appareils qui nécessitent le moins possible l'intervention d'un opérateur, via une régulation simple des entrées d'air par exemple en fonction de l'avancement de la combustion, ce type de technologie a été testé dans le projet EU Ultra Low Dust.

Les techniques de réduction (techniques primaires ou secondaires : électrofiltres, filtres catalytiques etc.) à installer sur les appareils existants, agissent pendant (dans la chambre de combustion) ou après (dans le conduit) la combustion pour réduire les émissions de polluants. Elles sont prometteuses en termes d'efficacité de réduction (Peren2Bois 2012, ERFI 2017) et évoluent rapidement mais présentent encore des contraintes importantes d'intégration dans l'habitat. Par ailleurs, des interrogations demeurent concernant l'efficacité et le coût à long terme, l'entretien de ces systèmes et leurs effets induits. Il semble nécessaire d'avoir des réponses à ces questionnements avant toute mise en œuvre à grande échelle.

Une information des utilisateurs et des différents acteurs (la formation des installateurs, l'information des fournisseurs de bois de chauffage), concernant les enjeux d'utilisation aussi bien énergétiques qu'environnementaux de ce mode de chauffage est également nécessaire à la réduction des émissions de la filière.

1.3. VOIES D'AMÉLIORATION

La caractérisation à l'émission des deux fractions, solide et condensable, est indispensable dans l'objectif d'établir des facteurs d'émission pertinents pour alimenter les inventaires d'émission.

Pour ce faire, les méthodes SPC ou DT, qui permettent une détermination de la fraction condensable, en plus de la fraction solide habituellement déterminée (méthode SP), doivent être préconisées.

S'agissant de la directive Ecoconception, l'établissement de valeurs limites contraignantes sur la fraction solide et les COVT devrait permettre d'améliorer les performances environnementales des appareils.

Il existe par ailleurs un enjeu fort d'harmonisation des méthodes. A terme, il serait souhaitable que la méthode de mesure proposée par le consortium EN_PME_TEST se substitue aux deux méthodes décrites dans la PrEN16510 afin de disposer d'une méthode et de valeurs limites communes à travers l'Europe.

L'amélioration et l'homogénéisation des pratiques de prélèvements est également essentielle pour garantir la génération de données d'émission fiables et comparables.

Pour ce faire, il apparaît nécessaire que les organismes réalisant les tests d'aptitude des foyers montrent leur capacité technique à réaliser ces essais à travers une accréditation selon le référentiel EN ISO 17025 pas uniquement sur les performances énergétiques (calcul du rendement), comme c'est le cas actuellement, mais également sur les mesures de polluants. L'équivalence des résultats produits par ces organismes pourrait par ailleurs être démontrée à travers la participation obligatoire à des exercices interlaboratoires organisés sur une matrice de gaz réelle par un organisme accrédité selon le référentiel EN ISO 17043.

La réalisation d'essais de performances et de détermination des facteurs d'émission plus représentatifs, avec notamment la prise en compte de l'ensemble de la période de combustion et des conditions tests proches des usages réels des appareils, est indispensable.

Ceci permettra d'éviter de mettre sur le marché des appareils uniquement optimisés pour fonctionner dans des conditions opératoires particulières non représentatives et permettre

des progrès suffisants des rendements et des niveaux d'émission des appareils utilisés en conditions réelles.

1.4. PERSPECTIVES

De nouvelles études portant sur la photo-réactivité des effluents de combustion du bois mais également d'autres sources (combustion fossile, émissions industrielles, etc.), seront nécessaires dans le futur afin d'évaluer le potentiel global de formation d'aérosols secondaires et de mieux cerner la contribution des différentes sources à la pollution de l'air.

Des actions d'amélioration des connaissances sur les autres sources biomasse (brûlages « sauvages », PME du bois...) seront également nécessaires pour mieux cerner la part des différentes contributions.

Une prise en compte du vieillissement des appareils en comparant par exemple les performances d'appareils neufs à celles d'appareils utilisés depuis plusieurs années, est nécessaire.

L'information de l'utilisateur notamment par la promotion de bonnes pratiques d'utilisation est indispensable. En effet, certaines pratiques mériteraient d'être supprimées de certaines notices telles que l'augmentation de la charge à faible allure si les performances de l'appareil ne sont pas connues à cette allure. D'autres pratiques telles que le mode d'allumage par le haut qui permettrait (ERFI, 2017) de réduire lors des allumages à froid de 30 à 50% des émissions polluantes sur un cycle complet de combustion, sont quant à elles à promouvoir auprès des utilisateurs. Cette information doit être réalisée avec la participation de tous les acteurs concernés par cette problématique en France, afin de rendre cohérent et homogène le discours à faire passer auprès de la population.

Un suivi de l'efficacité sur le long terme des actions engagées (renouvellement des appareils, information des utilisateurs, etc.) pour une évaluation de l'évolution de la contribution de la biomasse et d'autres sources de particules et de précurseurs de secondaires, aux concentrations mesurées dans l'air ambiant (dispositif CARA), mais aussi dans l'air intérieur sera enfin nécessaire.

2. GLOSSAIRE

2.1. PARAMETRES

Aérosol	Ensemble de particules, solides ou liquides, en suspension dans un milieu gazeux,
Particules totales	Ensemble des particules émises sans distinction de taille peut inclure la fraction solide seule ou la fraction solide et la fraction condensable selon la méthode de prélèvement mise en œuvre,
PM	Particulate matter,
TSP	Total Suspended Particles / Particules totales,
EC	Elementary Carbon (Carbone Élémentaire),
BC	Black Carbon,
Soot	Carbone suie : terme générique représentant les émissions carbonées réfractaires émises par les processus de combustion (indifféremment EC ou BC),
TOC/COVT/OCG/HCT	Total Organic Carbon (= Composés Organiques Volatils, <i>organic gaseous compounds</i> OGC),
SVOCs	Semi-Volatile Organic Compounds /Composé organiques semi-volatils,
VOCs	Volatile Organic Compounds / Composés organiques volatils,
CF	Condensable Fraction/Fraction condensable,
OC	Organic Carbon / Carbone organique,
OM	Organic Matter / Matière organique,
OPOA	Oxidized Primary Organic Aerosols / Aérosols Organiques Primaires Oxydés,
SOA	Secondary organic aerosols/Aérosols organiques secondaires.

2.2. METHODES DE MESURAGE

SP	Prélèvement de la fraction solide sur filtre chauffé (TSP)
SPC	Prélèvement de la fraction solide et des condensables sur filtre chauffé associé à un module de barbotage
DT	Prélèvement dans un tunnel à dilution, ratio de l'ordre de 10 à 20
DS	Prélèvement après dilution en tête de ligne, ratio supérieur ou égal à 100
FID	Flame Ionization Detector.

3. LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

Tableau 1 : Bilan des méthodes pour le mesurage des particules mises en œuvre dans les différentes normes, la directive Ecoconception et le label Flamme verte.....	25
Tableau 2 : Récapitulatif des corrélations observées entre les paramètres mesurés par les différentes méthodes	25
Tableau 3 : Comparaison des conditions de terrain et de laboratoire, influence sur les émissions de particules	30
Tableau 4 : principaux facteurs ayant une influence sur les performances environnementales et énergétiques des appareils de chauffage domestique au bois	31
Figure 1 : Processus de formation des particules à partir de combustion de bois, (Issue de Obernberger et al., 2007)	18
Figure 2 : Conversion des émissions de particules (total suspended particles :TSP) du conduit de cheminée jusqu'à l'atmosphère : exemple virtuel avec un total de AOS = 1,8 TSP, (d'après Nussbaumer et al., 2008b), Nota : PM10 ambient inclut l'aérosol primaire et secondaire.....	20
Figure 3 : Contribution de la combustion d'hydrocarbures, de biomasses et d'AOS	21
Figure 4 : Schéma de synthèse des paramètres pouvant être mesurés à l'émission et contribuant aux niveaux de particules dans l'air ambient (Fraboulet et al, position paper EN_PME_TEST), Nota : PM ambient inclut l'aérosol primaire et secondaire.....	23
Figure 5 : Comparabilité des résultats obtenus par les méthodes existantes en regard des concentrations émises et mesurées dans l'air ambient, (source : d'après Nussbaumer, 2010).....	24

4. INTRODUCTION

Le bois énergie est la première source d'énergie renouvelable utilisée en France, et la programmation pluriannuelle de l'Energie prévoit une contribution croissante pour la production électrique puisqu'elle doit passer de moins de 300 MW à fin 2014 à plus de 800 MW en fin 2023 (c'est-à-dire l'équivalent d'une croissance en équivalent production annuelle de 230 kTEP à 620 kTEP) et une croissance en proportion plus faible pour la production de chaleur (de 10 600 kTEP en 2013 à environ 13 500 kTEP en 2023).

Pour les installations de chauffage domestiques, l'ambition au niveau national, mentionnée par l'ADEME, est de porter de 8 à 9 millions le nombre de logements chauffés au bois d'ici à 2020, à consommation de bois constante. Tout l'enjeu est que ce développement utile à la lutte contre le changement climatique ait le moins possible d'impact sur la qualité de l'air et se fasse dans le respect des directives européennes de qualité de l'air qui fixent des seuils de niveaux maximum pour certains polluants. La combustion du bois est en effet à l'origine d'émissions de polluants particulièrement dans le cas d'appareils domestiques où la combustion peut s'avérer incomplète à certaines allures. Ces émissions ont un impact sur la qualité de l'air extérieur moyenne et la qualité de l'air intérieur (non spécifiquement traitée dans ce document). Elles peuvent par ailleurs, à certaines périodes de l'année et dans certaines zones, contribuer significativement aux épisodes de pollution atmosphérique. Actuellement, la France est en situation de contentieux avec la Commission européenne pour non-respect des niveaux de particules fines (PM₁₀) dans l'air de nos grandes villes ou vallées alpines. Or l'amélioration de la qualité de l'air est un enjeu majeur pour la santé humaine. Le décret du 10 mai 2017 et l'arrêté du 11 mai 2017 qui composent le Plan National de Réduction des Emissions de Polluants Atmosphériques (PREPA) fixe ainsi des objectifs de réduction des émissions de PM_{2,5}, SO₂, NO_x, NH₃ et COVNM à horizon 2020, 2025 et 2030 pour les quatre principaux secteurs émetteurs que sont les transports, le résidentiel-tertiaire, l'industrie et l'agriculture et détermine des actions de réduction à renforcer et mettre en œuvre.

Les données du Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA SECTEN 2015), indiquent que la combustion de bois dans les foyers domestiques (chaudières, inserts, foyers fermés et ouverts, cuisinières, etc) contribue pour une large part en France aux émissions annuelles nationales d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) à hauteur de 59%, de benzène pour 58% et de particules fines primaires (PM_{2,5}) pour 44%.

Il est donc important pour l'avenir de la filière bois-énergie de limiter et réduire son impact sur la qualité de l'air, notamment sur les niveaux de concentration en particules dans l'atmosphère.

Le présent document propose une synthèse des enseignements tirés des principales études concernant la caractérisation des émissions auxquelles l'INERIS a été partie prenante depuis une dizaine d'années. Il présente les principales connaissances, acquises concernant la nature des polluants émis, les méthodes pour les mesurer, les facteurs d'influence des émissions, et les leviers pour les réduire. Enfin il propose des premiers éléments sur le suivi de la contribution de la combustion de biomasse dans l'air ambiant et intérieur.

5. QUE FAUT-IL MESURER A L'EMISSION

5.1. PHYSICO-CHIMIE DE LA COMBUSTION DE BIOMASSE : GENERALITES SUR LES PARTICULES PRIMAIRES ET SECONDAIRES

Les particules présentes dans l'air ambiant, issues, plus ou moins directement, des processus de combustion de bois peuvent être divisées en deux catégories : primaires et secondaires.

- Les particules primaires incluent les particules présentes à l'état solide dans le conduit de cheminée et par convention la fraction dite condensable. Les particules solides à l'émission se forment principalement dans les zones les plus froides de la chambre de combustion. La fraction condensable est constituée d'espèces semi-volatiles (COSV) dont le poids moléculaire est élevé et qui, par refroidissement hors du conduit forment des particules par condensation. La concentration de la fraction solide peut être quantifiée par simple collecte sur un filtre chauffé, alors que la quantification de la concentration de la fraction condensable l'utilisation d'une méthode par piégeage dans un liquide approprié refroidi (méthode à barbotage) ou sur filtre après dilution des gaz (méthode du tunnel à dilution).
- Les particules secondaires se forment dans l'atmosphère après émission par des phénomènes de photooxydation, principalement à partir des précurseurs gazeux (composés organiques semi-volatils et volatils) les plus réactifs. Il n'existe à ce jour pas de méthode normalisée permettant de caractériser le potentiel de formation d'AOS d'une source.

5.1.1. PARTICULES PRIMAIRES

Les particules primaires sont constituées :

- d'une fraction inorganique,
- de carbone suie, également nommé Black Carbon (BC) ou carbone élémentaire (EC), selon les études (Carablack, 2018).
- d'une fraction organique,

La fraction inorganique est constituée essentiellement de matières minérales et sels (KCl, $K_3Na(SO_4)_2$, K_2SO_4 , etc.).

Les particules de carbone suie sont issues de la désagrégation dans la chambre de combustion de particules de bois complètement oxydées via des mécanismes complexes. Ces particules s'agglomèrent dès la sortie de la chambre de combustion jusqu'en sortie de cheminée puis dans l'air ambiant, progressivement, jusqu'à atteindre pour certaines des dimensions de plusieurs micromètres (Brandelet, 2016). Leur taille est néanmoins généralement comprise entre quelques dizaines et quelques centaines de nanomètres.

Lors de sa combustion, la biomasse se décompose en formant également une large variété de composés organiques qui ont des caractéristiques très différentes en termes de structure chimique et de pression de vapeur notamment. La quantité de composés organiques volatils formée est d'autant plus importante que la combustion est incomplète. Ces composés se retrouvent présents en grand nombre et forment, après nucléation, coagulation et condensation, des aérosols. Ces composés peuvent être répertoriés suivant leur point d'ébullition en deux grandes familles : les composés organiques volatils (Volatile Organic Compound - VOC) et les composés organiques semi-volatils (Semi-Volatile Organic Compound - SVOC).

En fonction de la température et de la dilution des fumées, ces derniers composés peuvent changer de phase. Initialement présents sous forme gazeuse dans le conduit de fumées, ils peuvent se transformer en aérosols liquides par condensation ou solides par adsorption sur les particules fines.

Des particules de bois incomplètement oxydées subsistent également dans l'effluent gazeux lors de certaines phases de combustion dégradées telles que l'allumage par exemple.

La distribution granulométrique des particules totales est typiquement bimodale (particules solides et particules issues de la coagulation plus ou moins prononcée des aérosols liquides). Dans ce secteur de la combustion domestique du bois, 90 à 95% en masse des émissions de particules sont des particules fines ($PM_{2.5}$).

La formation des particules et de l'aérosol lors de la combustion de bois est illustrée sur la Figure 1.

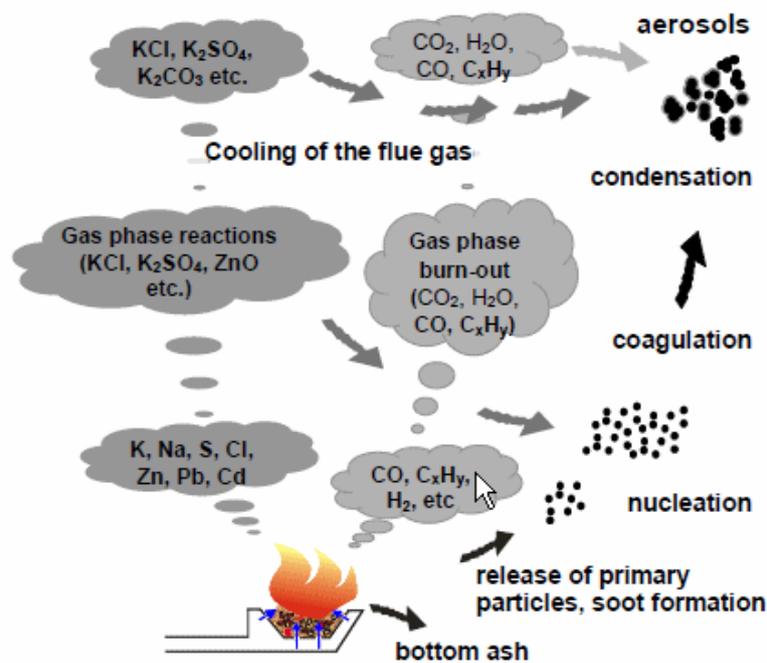


Figure 1 : Processus de formation des particules à partir de combustion de bois, (Issue de Obernberger et al., 2007)

5.1.2. MECANISMES DE (TRANS-)FORMATION DES AEROSOLS ISSUS DE LA COMBUSTION DE BIOMASSE

Les mécanismes de (trans-)formation, susceptibles d'affecter les aérosols issus de la combustion de biomasse ont notamment été décrits par Nussbaumer et al. (2008a et 2010). Les particules solides, essentiellement constituées de matières minérales et de carbone élémentaire, présentes initialement dans le conduit de fumées, peuvent adsorber des molécules organiques. Elles s'agglomèrent également progressivement dans le conduit de fumées pour atteindre des dimensions de l'ordre du micron (Brandelet, 2016).

Les espèces organiques semi-volatiles peuvent :

- Pour les espèces de poids moléculaires les plus élevés, condenser en phase particulaire du fait de l'abaissement de la température, malgré la diminution de leur tension de vapeur liée à la dilution. Cette condensation des composés organiques semi-volatils sur les particules préexistantes a lieu très rapidement, immédiatement après rejet dans l'air ambiant (Champrobois, 2014), en lien avec l'abaissement de la température (de 200-350°C à l'émission à moins de 20°C en champ très proche).

Les composés les plus légers ($MM \leq 180-192 \text{ g.mol}^{-1}$) restent essentiellement en phase gazeuse alors que les composés les plus lourds ($MM \geq 273 \text{ g.mol}^{-1}$, en allure nominale, et $MM \geq 230 \text{ g.mol}^{-1}$, en allure réduite) restent associés à la phase particulaire. Les différences observées entre allures nominale et réduite pour les composés lourds sont liées a priori à la différence de température d'émission des fumées ($\leq 275^\circ\text{C}$ en allure réduite vs $\geq 340^\circ\text{C}$ en allure nominale). De plus, la dilution après le champ très proche peut engendrer une ré-évaporation de certains composés qui sont donc transférés de la phase particulaire à la phase gazeuse,

- Pour les espèces de poids moléculaires les plus faibles, rester en phase gazeuse du fait de la diminution de leur tension de vapeur liée à la dilution, malgré l'abaissement de la température,

- Pour les espèces les plus réactives, se transformer (s'oxyder) en aérosols dits secondaires (AOS), notamment par réactions photochimiques dans l'atmosphère. La masse de poussières dans l'air ambiant peut ainsi être supérieure à la somme des particules solides et des composés condensables présents initialement à l'émission (notamment par addition d'oxygène). Des réactions d'oxydation rapide avec des oxydants issus du processus de combustion (en l'absence de lumière) peuvent aussi avoir lieu dans le conduit d'évacuation des fumées et conduire à la formation d'aérosols organiques primaires oxydés (OPOA) (Champrobois, 2014, Nalin et al., 2016). Les composés formés, faisant partie intégrante de l'AOS ou OPOA, pourraient présenter un caractère toxique plus important.

Immédiatement après leur émission dans l'air ambiant, les aérosols issus des foyers domestiques sont donc profondément modifiés du fait de l'importante dilution des fumées et des faibles températures du milieu ambiant.

Une illustration des transformations qui ont lieu lors de l'entrée de l'effluent gazeux dans l'atmosphère du fait de l'abaissement des températures, de la dilution et des réactions secondaires, est présentée sur la Figure 2. Cet exemple décrit une concentration résultante de PM_{10} dans l'atmosphère correspondant à 2,8 fois la masse de particules solides présente dans la cheminée, la différence étant attribuée aux aérosols organiques secondaires (AOS ou SOA en anglais) formés par condensation dans l'air ambiant et à l'addition de nouvelles molécules résultant de l'oxydation secondaire des composés organiques volatils en semi-volatils.

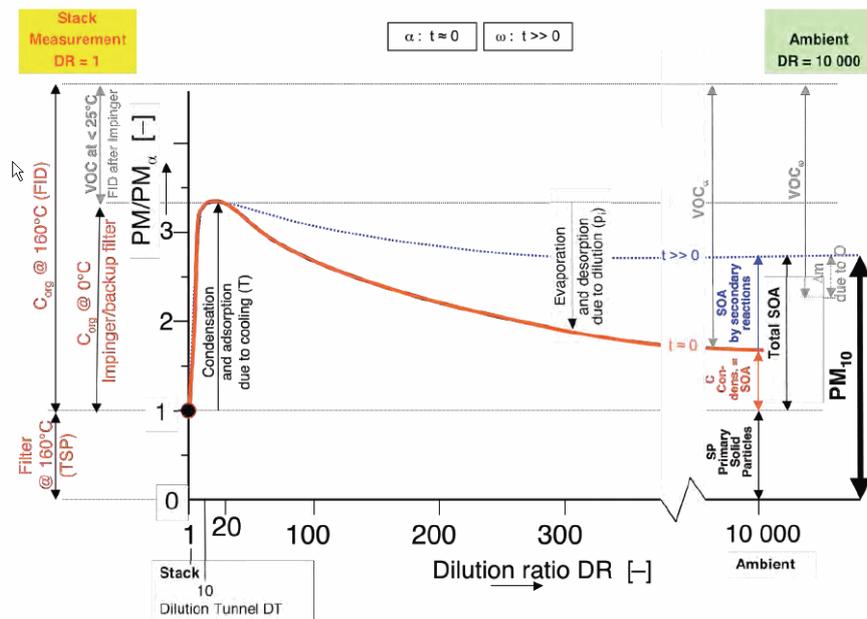


Figure 2 : Conversion des émissions de particules (total suspended particles : TSP) du conduit de cheminée jusqu'à l'atmosphère : exemple virtuel avec un total de AOS = 1,8 TSP, (d'après Nussbaumer et al., 2008b), Nota : PM10 ambiant inclut l'aérosol primaire et secondaire

Différentes études de dilution des émissions de combustion de bois montrent clairement que la fraction organique condensable est prépondérante (Lipsky et Robinson, 2006 ; Shrivastava et al., 2006) ; plus de la moitié des composés organiques émis lors de la combustion de bois s'évaporant à une température de 50°C (Grieshop et al. 2009a).

Cette fraction organique condensable peut largement être réduite par l'amélioration des conditions de combustion, ce qui explique la quasi-inexistence de celle-ci sur des installations de plus fortes puissances où les temps de séjour des gaz et particules est plus conséquent et les niveaux de température plus élevés. L'amélioration des conditions de combustion intervient également sur le carbone élémentaire (EC) et organique (OC) de la fraction solide mais aussi sur l'envolée des cendres minérales. Lorsque la qualité de la combustion se dégrade, l'augmentation des émissions de fraction condensable est étroitement liée à l'augmentation de la teneur en matière organique tandis que la teneur en black carbon (BC) diminue (Albinet et al. 2015a).

La part des espèces inorganiques condensables est en général considérée comme négligeable.

La formation et l'évolution dans l'atmosphère des composés secondaires issus des précurseurs organiques plus ou moins volatils émis par la combustion du bois sont encore assez mal connues alors que cet AOS peut contribuer de façon importante à la pollution particulaire, comme illustré par la Figure 3.

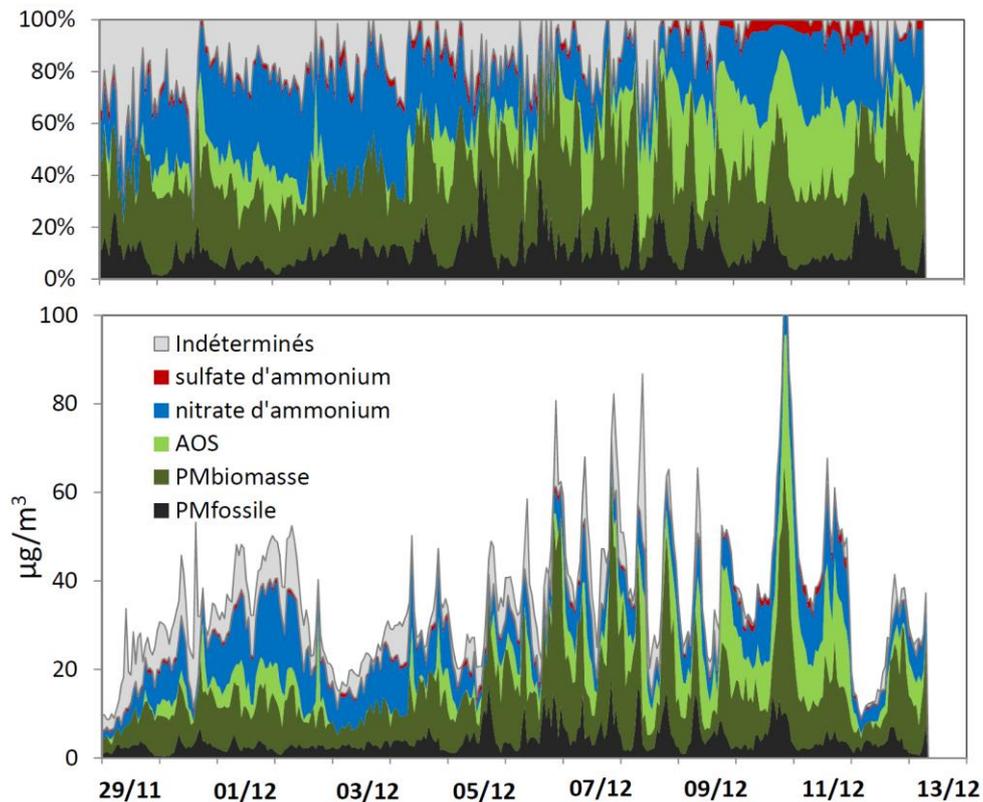


Figure 3 : Contribution de la combustion d'hydrocarbures, de biomasses et d'AOS à l'épisode de pollution de décembre 2016 à Poitiers (Résultats du programme CARA du LCSQA), Nota : PM (biomasse et fossile) correspond à la part de l'aérosol primaire, l'aérosol secondaire correspond à AOS, nitrate d'ammonium et sulfate d'ammonium

Il apparaît donc primordial de pouvoir évaluer le potentiel de formation d'AOS depuis l'émission, afin de déterminer la contribution de la combustion domestique du bois aux niveaux de concentrations de particules observés dans l'air ambiant.

Compte tenu de la méconnaissance des processus physico-chimiques affectant les particules issues des foyers domestiques et du temps nécessaire à la formation d'aérosols secondaires, une relation entre les niveaux de concentrations des émissions de particules primaires mesurées à l'émission de l'installation et les niveaux de concentrations en particules effectivement mesurés dans l'air ambiant ne peut actuellement être bien établie. La caractérisation des deux fractions, solide et condensable, est donc indispensable dans l'objectif d'établir, avec ces nouvelles données, des facteurs d'émission pertinents pour qualifier la qualité de la combustion.

6. QUELLE METHODE DE MESURAGE DES PARTICULES UTILISER ET COMMENT AMELIORER LA FIABILITE DES RESULTATS OBTENUS ?

Les tests de performances des appareils de chauffage domestique au bois incluent notamment la détermination du rendement et des niveaux d'émissions en CO, particules et COVT. Les normes applicables pour la réalisation (procédure d'allumage des appareils et méthodes de mesurage) de ces tests sont la NF EN 13240¹ pour les foyers fermés et les poêles et la NF EN 13229² pour les foyers ouverts. Une refonte de ces normes est en cours, à travers la publication future de la NF EN16510-1³. La directive Ecoconception⁴ fixe des exigences de conception, de rendement et d'émissions de polluants aux produits liés à l'énergie commercialisés sur le territoire européen, le volet de la directive correspondant aux appareils de chauffage domestique au bois devrait entrer en vigueur en 2022. Au niveau français le label Flamme Verte a été lancé en 2000 par les fabricants d'appareils domestiques avec le concours de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Géré par le Syndicat des énergies renouvelables (SER), Flamme Verte labellise les appareils indépendants (foyers fermés, insert, poêles à bûches et granulés) de chauffage au bois sur la base des niveaux énergétiques et environnementales déterminés dans des laboratoires notifiés, par la commission européenne pour la réalisation des essais de conformité des appareils dans le cadre de l'obligation du marquage CE, appliquant les normes en vigueur (actuellement NF EN13240 et NF EN 13229).

6.1. LES METHODES STANDARD NATIONALES DE MESURAGE DES EMISSIONS PARTICULAIRES

Aucune méthode normalisée de mesurage des émissions de particules ne bénéficie d'un consensus au niveau Européen. Les principales méthodes utilisées sont présentées en annexe.

Deux méthodes, celle du prélèvement sur filtre chauffé (SP) et celle du prélèvement dans un tunnel à dilution (DT) sont majoritairement utilisées par les laboratoires notifiés, et ont été sélectionnées dans le projet de norme Pr EN 16510-1 en cours de publication. Une troisième méthode plus marginale, utilisée au Royaume-Uni consiste en un prélèvement au moyen d'un électrofiltre.

Cette situation a un impact sur la réalisation des essais de performance d'une part et de ceux destinés à la détermination des facteurs d'émission d'autre part, les résultats présentés dans les inventaires étant nécessairement liés aux méthodes de mesurage mises en œuvre et aux mesurandes associés. En effet, les grandeurs mesurées par ces méthodes peuvent différer, la méthode SP détermine spécifiquement la fraction solide de l'aérosol alors que la méthode DT englobe également la fraction condensable. Le schéma suivant (Figure 4) propose une synthèse des paramètres pouvant être mesurés à l'émission et contribuant aux niveaux de particules dans l'air ambiant.

¹ NF EN 13240/A2 Juin 2005 Poêles à combustible solide - exigences et méthodes d'essai

² NF EN 13229 Juin 2002 Foyers ouverts et inserts à combustibles solides - exigences et méthodes d'essai

³ Pr NF EN16510-1 Equipement de chauffage domestique - Partie 1 : exigences et méthodes d'essai générales -

⁴ DIRECTIVE ECOCONCEPTION : 2009/125/CE du parlement européen et du conseil du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie

La Directive Ecoconception, fait quant à elle référence à quatre méthodes de mesure (la méthode SP, 2 variantes de la méthode DT, et une méthode basée sur l'utilisation d'un électrofiltre) pouvant être utilisées par les laboratoires notifiés, pour déterminer la performance des appareils qui seront mis sur le marché à partir de 2022 ; avec des valeurs limites distinctes selon les méthodes utilisées (voir tableau en annexe, Tableau 1).

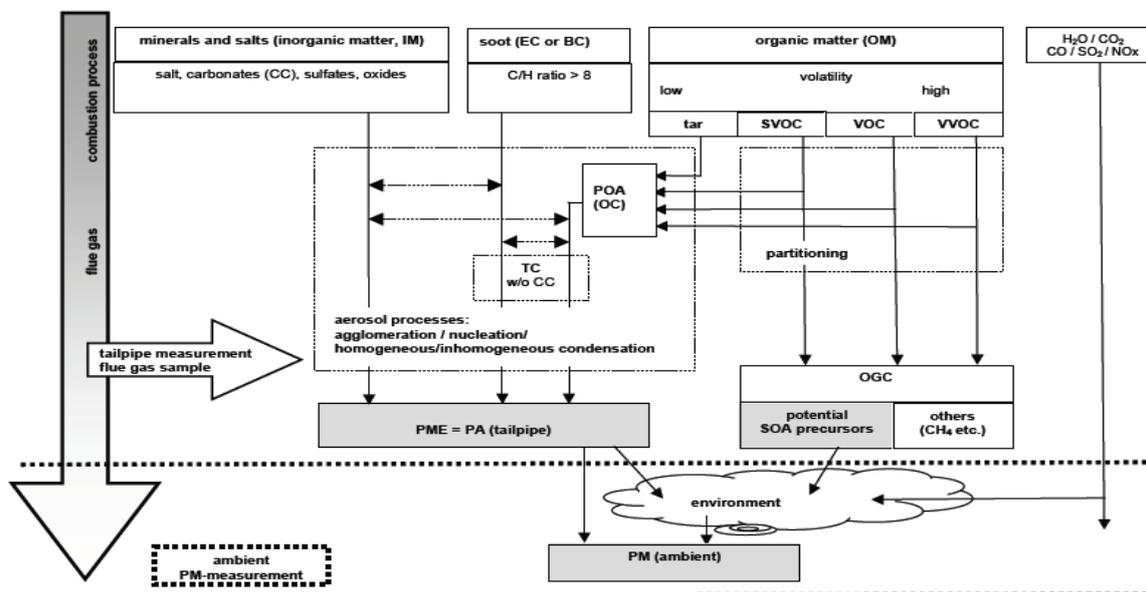


Figure 4 : Schéma de synthèse des paramètres pouvant être mesurés à l'émission et contribuant aux niveaux de particules dans l'air ambiant (Fraboulet et al, position paper EN_PME_TEST), Nota : PM ambiant inclut l'aérosol primaire et secondaire

Enfin, une méthode a été proposée suite aux travaux du projet EN_PME_TEST (ERANET 2012-2015) réalisé par un consortium de 13 pays européens coordonné par l'INERIS. Cette approche basée sur la méthode du filtre chauffé (SP), combinée au mesurage des composés organiques volatils totaux (COVT ou TVOC, OGC, THC en anglais) au moyen d'une analyse FID (détection à ionisation de flamme), pourrait, sous deux à trois ans se substituer aux deux méthodes présentées dans la PrEN 16510-1, elle est actuellement discutée au CEN TC 295 WG5.

La figure ci-après issue de Nussbaumer, 2010, propose une synthèse de la comparabilité des résultats obtenus par les différentes méthodes (SP, DT, SPC et DS) en regard des concentrations émises (stack) et mesurées dans l'air ambiant (ambient).

En plus des méthodes SP et DT déjà présentées, on trouve sur cette figure, la méthode SPC qui consiste à combiner le prélèvement de la fraction solide sur filtre chauffé au prélèvement de la fraction condensable par barbotage et la méthode DS qui consiste en une dilution avec un ratio de dilution plus élevé que celui obtenu avec un tunnel à dilution.

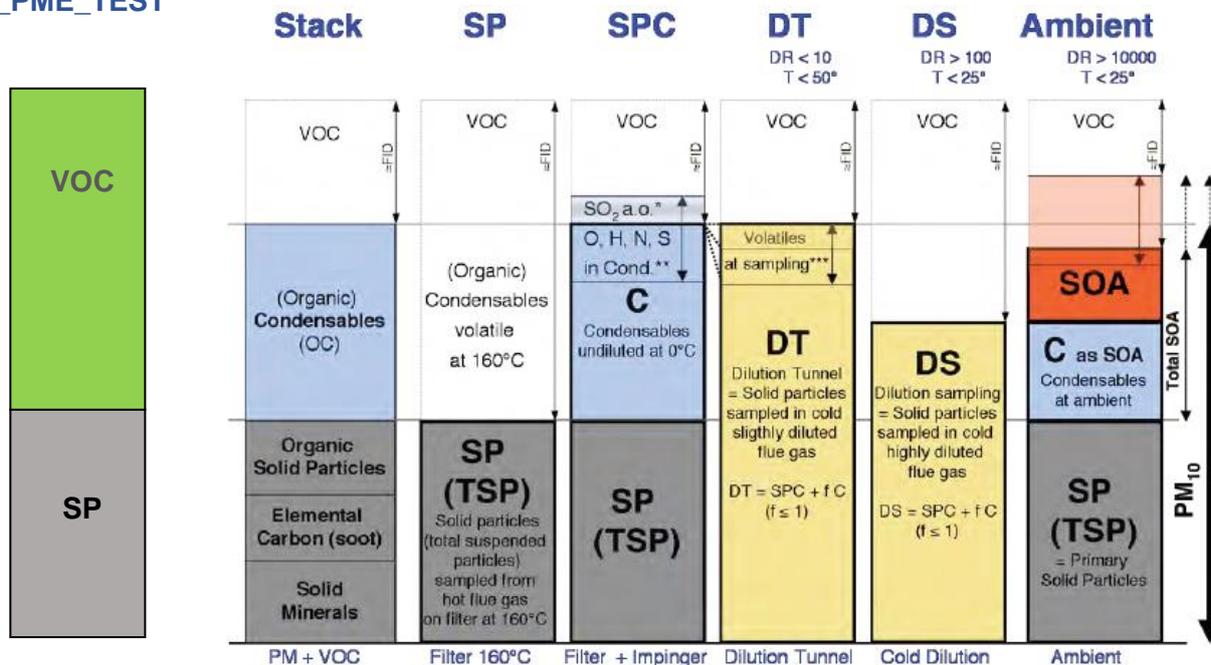
Notons, par ailleurs, que les laboratoires notifiés français ne sont pas équipés pour la mise en œuvre en routine des méthodes SPC et DT (nécessité de disposer d'un tunnel à dilution, d'un laboratoire pour le traitement des échantillons d'isopropanol).

Le paramètre COVT est également important en tant que tel, car les quantités de COV émises augmentent quand les conditions de combustion se dégradent et parce que certains COV sont des précurseurs d'aérosols organiques secondaires.

Il est donc à la fois un indicateur de la qualité de la combustion et du potentiel de formation d'AOS. C'est la raison pour laquelle il est intégré à la méthode EN_PME_TEST en complément du prélèvement sur filtre chauffé (SP).

Un bilan des méthodes décrites dans les différentes normes et prescrites par la directive Ecoconception et le Label Flamme verte est présenté dans le Tableau 1.

EN_PME_TEST



SP: Filter (Method a) resulting in solid particles SP (total suspended particles TSP).

SPC: Filter + Impinger (Method b) resulting in solid particles and condensables SPC.

DT: Dilution Tunnel (Method c) with typical dilution ratio (DR) in the order of 10 resulting in a PM measurement including SPC and most or all C. DT is identical or slightly smaller than SPC + C due to potentially incomplete condensation, depending on dilution ratio and sampling temperature (since dilution reduces not only the temperature but also the partial pressure of contaminants).

DS: Dilution Sampling with high dilution ratio (DR > 100).

PM₁₀: Total Particulate Matter < 10 microns In the ambient Including SP and SOA

SOA: Secondary organic aerosols, consisting of condensables C at ambient and SOA formed by secondary reactions such as photochemical oxidation.

*SO₂ and other soluble gaseous compounds in the flue gas may be dissolved in the impingers.

**In case of determination of TOC in impingers, the mass of O, H, N, S and other elements contained in the organic condensables needs to be accounted for separately.

***Organic compounds that are liquid or solid at partial pressure in the flue gas and ambient temperature but volatile at sampling due to reduced partial pressure by dilution and temperature above ambient.

Figure 5 : Comparabilité des résultats obtenus par les méthodes existantes en regard des concentrations émises et mesurées dans l'air ambiant, (source : d'après Nussbaumer, 2010)

Tableau 1 : Bilan des méthodes pour le mesurage des particules mises en œuvre dans les différentes normes, la directive Ecoconception et le label Flamme verte

Méthode de mesure des poussières Mise en œuvre Dans Norme/Directive/Label	SP	SPC	DT	Electrofiltre
EN 13240 EN 13229	X		X	X
Pr EN 16510-1	X		X	
US EPA 5H		X		
US EPA 5G			X	
NS 3058			X	
Directive Ecoconception (Projet)	X		X	X
Label Flamme Verte	X			

6.2. LES RESULTATS OBTENUS PAR LES DIFFERENTES METHODES SONT-ILS CORRELES ?

Pour permettre de comparer les résultats obtenus au moyen de ces différentes méthodes, des corrélations ont été recherchées. L'ensemble des corrélations disponibles entre méthodes est présenté dans le Tableau 2.

Des corrélations assez médiocres sont observées entre la méthode DT et la méthode SPC quand le solvant de barbotage est l'eau (méthode US EPA 5H, Source US EPA). Ceci pourrait être dû au fait que certaines espèces inorganiques gazeuses tels que les SO₂, SO₃, peuvent interférer (former des composés solides dans l'eau dans certains cas) et générer un biais dans les résultats. En revanche la corrélation est très bonne (pente 0,97, R² 0,92, n=45) quand le solvant de barbotage est l'isopropanol (IPA) (mise en œuvre INERIS).

Une corrélation correcte (pente 0,43, R²=0,73, n=78) est également observée entre les paramètres fraction condensable (C) déterminée par la méthode SPC IPA et COVT déterminé par FID, (mise en œuvre INERIS et CTIF). D'après les conclusions du projet Identech (Identech, 2017), aucune corrélation n'est par ailleurs observée entre ces deux paramètres sur certains appareils très performants (facteurs d'émission de particules fractions solide et condensable inférieurs à 2 g/kg de bois sec brûlé).

Tableau 2 : Récapitulatif des corrélations observées entre les paramètres mesurés par les différentes méthodes

	Facteur de Corrélation (méthode)	Coefficient de corrélation (R ²)	Source
Méthode SPC vs méthode DT	SPC eau= 1,820 (DT) ^{0,83} (US EPA)	0,52	US EPA
SPC : filtre (SP) et barboteur (C)	SPC eau = 1,333 (DT)	0,52	US EPA
Méthode SPC vs méthode DT	SPC IPA = 0,97 (DT)	0,92	INERIS
C : fraction condensable COVT : mesure FID	C IPA = 0,43 (COVT)	0,73	INERIS, CTIF essais exploratoires Flamme verte

6.3. HOMOGENEISATION DES PRATIQUES

En complément du choix d'une méthode unique, l'amélioration et l'homogénéisation des pratiques de prélèvements est essentielle pour garantir la génération de données d'émission fiables et comparables en Europe. Pour ce faire :

- pour les différentes méthodes, les facteurs d'influence sur les résultats doivent être identifiés ;
- des protocoles précis tenant compte de ces facteurs d'influence et décrivant les bonnes pratiques doivent être rendus disponibles ;
- des exercices de comparaisons interlaboratoires doivent être réalisés afin d'évaluer les performances des méthodes (incertitude) et de promouvoir les bonnes pratiques au sein des laboratoires.
- il apparaît nécessaire que les organismes réalisant les tests de performances énergétiques et environnementales des foyers montrent leur capacité technique à réaliser ces essais à travers une accréditation COFRAC selon le référentiel NF EN ISO 17025⁵ pas uniquement pour les paramètres énergétiques mais également pour les paramètres environnementaux (CO, COV, NOx, particules). L'équivalence des résultats produits par ces organismes pourrait être démontrée à travers la participation obligatoire à des exercices interlaboratoires organisés sur une matrice de gaz réelle par un organisme accrédité selon le référentiel NF EN ISO 17043⁶.

Ceci permettrait par ailleurs de crédibiliser le label Flamme Verte et les contrôles réalisés dans le cadre de la Directive Eco-design.

Enfin, quelles que soient les méthodes de mesurage préconisées, les procédures d'utilisation des appareils de chauffage pendant les essais, doivent être adaptées. Ceci afin de prendre en compte l'impact (cf. § 5 et 6) des régimes réduits, et des phases transitoires (allumage, extinction, rechargement) sur les niveaux d'émission déterminés.

6.4. PERSPECTIVES : QUELLE METHODE DE MESURAGE PRECONISER POUR DETERMINER LES PERFORMANCES DES APPAREILS OU ETABLIR DES FACTEURS D'EMISSION ?

Les fractions solide et condensable pouvant varier en absolu et en proportion selon les appareils et les conditions d'essais, il est dommageable en termes de connaissance des émissions de ne pas systématiquement mesurer la fraction condensable. Rappelons en effet que l'amélioration des conditions de combustion conduit à une réduction significative des émissions de composés organiques condensables, mais aussi des volatils (COVT). Ces paramètres augmentent par exemple nettement lors d'un fonctionnement à allure réduite. Leur prise en compte s'avère donc plus discriminante pour identifier les appareils les plus performants, que la seule prise en compte de la fraction solide. Les émissions de COVT évoluent dans le même sens que les émissions de particules condensables ce qui fait des COVT un bon indicateur de la fraction condensable, mais pas de façon étroitement corrélée, du fait de la présence d'espèces organiques légères très majoritaires, pouvant représenter plus de 60 à 90% des émissions, selon le niveau de performance appareils (Identech, 2017).

⁵ NF EN ISO 17025 :2005 - Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais.

⁶ NF EN ISO 17043 :2010 Évaluation de la conformité - Exigences générales concernant les essais d'aptitude

6.4.1. EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES APPAREILS

Dans l'objectif de vérifier le respect des valeurs limites réglementaires ou d'évaluer les performances des appareils, les méthodes SP ou DT définies dans la norme CEN PrEN16510 doivent être utilisées. Celles-ci figurent, parmi les quatre méthodes autorisées, dans la directive Eco-conception qui fixe des valeurs limites distinctes selon les méthodes utilisées (voir § 0).

Pour la détermination de la fraction solide des particules, la méthode SP reste la méthode de référence. La méthode SPC, malgré son intérêt, a été rejetée par le CEN en 2011 ; elle ne peut donc pas être utilisée pour évaluer la performance des appareils.

Le paramètre COVT étant reconnu comme un bon indicateur de la fraction condensable, l'application conjointe de valeurs limites contraignantes sur la fraction solide et les COVT devrait permettre d'améliorer les performances environnementales des appareils ; aussi bien que le permet l'application d'une valeur limite sur les fractions solides et condensables conjointes telles que mesurées avec la méthode du tunnel à dilution.

Enfin, à terme, il serait souhaitable que la méthode proposée par le consortium EN_PME_TEST se substitue aux deux méthodes décrites dans la PrEN16510 afin de disposer d'une méthode et de valeurs limites communes à travers l'Europe.

6.4.2. DETERMINATION DES FACTEURS D'EMISSION

Dans l'objectif d'établir des facteurs d'émission de polluants, les méthodes SPC ou DT, qui permettent une détermination plus complète des émissions de particules totales (fractions solide et condensable), doivent être préconisées et notamment dans le cadre de programmes de recherche. La méthode SPC permet en outre de se comparer par rapport à la méthode SP, largement utilisée jusqu'ici. Sur un cycle complet de combustion, la part de la fraction solide (déterminée au moyen de la méthode SP) dans les particules totales (déterminées au moyen de la méthode SPC) est d'environ 36% (Afac, 2016). Dans les pays où seule la méthode SP est utilisée, l'application de la corrélation déterminée entre le paramètre COVT et le paramètre fraction condensable, devrait permettre en première approche de disposer de facteurs d'émission plus pertinents. Cette approche ne pourrait cependant être utilisée que de manière temporaire tant que le parc d'appareils comprend une part significative d'appareils peu performants, car cette corrélation n'est plus valide pour les appareils les plus performants (facteurs d'émission inférieurs à 2 g/kg de bois sec brûlé).

6.5. PERSPECTIVES : VERS UN PROTOCOLE EUROPEEN PRENANT EN COMPTE LES AEROSOLS ORGANIQUES SECONDAIRES ?

Malgré leur intérêt, ces protocoles utilisés à l'émission des appareils ne rendent pas bien compte de la contribution des appareils de chauffage domestique au bois aux teneurs en particules dans l'air ambiant qui résultent des émissions primaires de particules mais également de la formation des aérosols secondaires, majoritairement organiques (AOS). Il n'existe à ce jour pas de méthode normalisée permettant de caractériser le potentiel de formation d'AOS d'une source.

Une meilleure connaissance de cette contribution passe par :

- l'étude des mécanismes de transformation, ce qui est une approche complexe,
- l'évaluation du potentiel de formation d'aérosols secondaires des émissions issues des appareils, .

Dans le cadre du projet EN PME TEST, **une méthode visant à évaluer le potentiel maximal de formation d'un aérosol organique secondaire par un micro tube de réactivité (μ smog chamber), a été testée. Ce micro-tube de réactivité vise à simuler la formation d'AOS par photochimie (rayonnement UV, introduction d'oxydant) en la forçant pendant un temps de réaction de l'ordre de la seconde.**

Cette technique qui ne vise pas à décrire les phénomènes de formation d'aérosols secondaires, mais à déterminer le potentiel de formation d'aérosols organiques secondaires associé aux émissions des appareils de chauffage domestique au bois donne des résultats du même ordre de grandeur que ceux obtenus par les chambres ou tubes de réactivité traditionnels (Bruns et al., 2015). Elle est donc tout à fait pertinente. Ce type de méthode ne sera toutefois probablement pas disponible à brève échéance, **et n'est pas encore suffisamment mature pour être proposée en tant que méthode normalisée au niveau européen. Il est toutefois souhaitable de poursuivre dans cette voie.**

7. CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT ET PERFORMANCES

L'influence des paramètres de fonctionnement sur la qualité de la combustion et les émissions polluantes des appareils a fait l'objet d'une étude bibliographique récente (rapport INERIS DRC-17-164787-08043A) basée sur l'analyse d'une quinzaine de travaux expérimentaux de l'INERIS et d'autres organismes. Elle a permis de dégager des tendances sur les facteurs d'influence des émissions et les écarts pouvant être observés sur les performances environnementales et énergétiques des appareils selon les conditions réalisation des tests.

7.1. REPRESENTATIVITE DES PROTOCOLES DE CARACTERISATION DES EMISSIONS ET DU RENDEMENT

Les tests menés selon les normes NF EN 13240¹ et 132292² et le projet de norme européenne prEN 16510-1³ pour l'évaluation des performances énergétiques et environnementales des appareils indépendants, sont effectués dans des conditions optimales de fonctionnement de ces équipements. La dernière version du projet de norme européen propose la réalisation de tests facultatifs à la puissance nominale et à charge partielle. Ces essais sont obligatoires dès lors que le constructeur spécifie cette puissance. L'appareil est alors mis en œuvre selon les spécifications du fabricant notamment concernant le tirage, la masse de combustible d'essais introduite et le réglage des entrées d'air.

Les conditions normalisées décrites brièvement dans le Tableau 3 ci-après sont souvent relativement éloignées des conditions réelles de fonctionnement. En effet, l'utilisateur sera souvent amené à faire fonctionner son appareil :

- à allure réduite (en limitant les entrées d'air comburant - pas de test normalisé prévu à cette allure) :
 - car son besoin en chauffage ne correspond pas en continu à la puissance nominale délivrée par l'appareil,
 - si celui-ci a été dimensionné pour subvenir à des épisodes de grand froid,
 - pour compenser un tirage trop élevé de son installation (cf. paragraphe ci-après),
 - si l'utilisateur n'est pas physiquement présent pour recharger le foyer (cas des fonctionnements nocturne par exemple),
- avec une charge de bois et une qualité de bois variable (dimension, diamètre, humidité des bûches, essences de bois, quantité d'écorce, etc.). Tous ces paramètres jouent un rôle sur la qualité de la combustion et donc sur les émissions de particules,
- avec une réserve de braises non optimisée. Une faible réserve de braises rend l'allumage de la nouvelle charge introduite plus difficile et plus longue,
- avec un tirage en général supérieur à 12 Pa. Le tirage varie de façon importante d'un logement à l'autre en fonction de la hauteur du conduit et de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur. Des tirages supérieurs à 20 Pa sont courant pour des conduits de hauteur supérieurs à 8 m. Un tirage important n'est pas particulièrement défavorable mais provoque une combustion plus rapide qui peut amener l'utilisateur à faire fonctionner son appareil à allure réduite. Le tirage varie en fonction de l'avancement de la combustion.

La réalisation des tests par un professionnel permet également de minimiser la formation de polluants (réglage optimisé, charge de bois optimale, agencement des bûches afin de favoriser le passage de l'air, etc.).

Enfin, les foyers sont testés sortie usine, or chez le particulier au cours du temps une usure des joints et des déformations du foyer peuvent avoir lieu, pouvant engendrer des entrées d'air parasites.

La réalisation de tests suivant la norme prEN 16510-1 conduit :

- **à sous-estimer fortement les émissions réelles de polluants, notamment de CO et COVt émis en grande quantité lors de l'allumage et du régime de braises et de PM émis essentiellement lors de l'allumage (pour ces polluants, la réalisation des prélèvements tels que décrit dans la norme pendant la période de 30 minutes, qui démarre trois minutes après la mise en place des bûches dans la chambre de combustion c'est-à-dire la période de combustion vive, au lieu d'un cycle entier de combustion participe fortement à cette sous-estimation),**
- **à surestimer le rendement, de 5 à 16 % ou points (Afac, 2016 : 5 points ; BeReal, 2016 : 16 points).**

Tableau 3 : Comparaison des conditions de terrain et de laboratoire, influence sur les émissions de particules

Conditions de terrain (utilisateur)	Conditions de laboratoire (essai normalisé)	Influence sur les émissions de particules
Fonctionnement à allure réduite	Non prévu dans la norme (test effectué uniquement à allure nominale)	Augmentation forte des émissions à allure réduite
Tirage trop important pour des conduits supérieurs à 4 m (> 20 Pa)	Tirage fixé par la norme : 12 Pa	Fonctionnement au-delà de la puissance nominale qui sans réduction du tirage conduit à une surconsommation de bois, une perte de rendement ainsi qu'à une réduction de l'allure de fonctionnement de l'appareil
Variation du tirage en fonction des conditions extérieures	Tirage régulé et constant : 12 Pa	A priori faible
Hauteur du conduit variable en fonction des habitations	Hauteur faible et constante (environ 2 m)	Augmentation du tirage, du dépôt de particules et du rendement (faible) avec la hauteur du conduit
Démarrage à froid	Réalisation des essais à chaud après allumage et mise en régime du foyer	Un démarrage à froid est nettement plus émissif (cela dépend étroitement des conditions d'allumage)
Essences de bois, tout venant	Essences pour lesquelles les appareils ont été conçus, d'où de faibles émissions	Etroitement liée aux caractéristiques de l'appareil (entrées d'air). Emissions en général plus fortes lors de la combustion de chêne ou de résineux
Humidité du bois, tout venant (12 à 25%, voire plus)	Humidité faible : $16 \pm 4\%$ ($15 \pm 3\%$ prEN 16510)	Augmentation des émissions avec la teneur en humidité du bois notamment au-delà de 25%, le rendement et la puissance délivrée diminuent
Charge de bois introduite variable	Charge optimale déterminée en fonction de la puissance nominale de l'appareil	Influence faible tant qu'on ne s'éloigne pas trop de la charge optimale
Dimension des bûches, tout venant	Diamètre minimum et longueur conforme aux spécifications de la norme	Influence a priori faible sauf cas extrême provoquant une inhomogénéité des températures et du passage de l'air
Cycle complet de combustion (allumage, combustion vive, régime de braises)	Allumage (en partie) et combustion vive (durée de l'essai : 30 mn)	Les émissions les plus élevées sont constatées lors de l'allumage du foyer et du régime de braises (CO et COVt)
Conduite de l'appareil	Réalisé par un professionnel	Quantités chargées, agencement des bûches, fréquence de chargement sont susceptibles d'intervenir sur les émissions
Vieillessement du foyer	Non prévu (pas de test d'usure à la combustion)	Augmentation forte des émissions (entrée d'air parasites)

7.2. INFLUENCE DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DES APPAREILS SUR LES EMISSIONS DE POLLUANTS ET LES RENDEMENTS

Les principaux facteurs ayant une influence sur les performances environnementales et énergétiques des appareils sont les suivants :

- Humidité du bois,
- Essence de bois,
- Allure,
- Charge,
- Tirage,
- Vieillesse des appareils.

Les principaux résultats relatifs à l'influence de ces paramètres sont présentés en annexe et synthétisés dans le tableau ci-après.

Tableau 4 : principaux facteurs ayant une influence sur les performances environnementales et énergétiques des appareils de chauffage domestique au bois

	Humidité (> 25% / 15%)	Allure (réduite / nominale)	Essence	Ecorce (avec / sans)	Mode d'allumage
CO	Forte	Forte	Moyenne	Pas d'influence	Chaud/Froid : Moyenne Bas/Haut : Forte
COVt	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Chaud/Froid : Moyenne Bas/Haut : Forte
NO _x	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Chaud/Froid : Faible Bas/Haut : Faible
PM	Forte	Forte	Forte	Forte	Chaud/Froid : Forte Bas/Haut : Forte
η	Moyenne	Moyenne	Faible	Pas d'influence	Chaud/Froid : Faible Bas/Haut : Forte

	Phases de combustion	Charge (partielle / nominale)	Plate-forme	Vieillesse du foyer (> 3 ans / neuf)
CO	Forte	Faible	Faible	Inconnue
COVt	Forte	Faible	Moyenne	Inconnue
NO _x	Moyenne	Faible	Pas d'influence	Inconnue
PM	Forte	Faible	Faible	Forte pour les appareils étanches
η	Moyenne	Faible	Faible	Inconnue

A noter que l'action simultanée de plusieurs facteurs dégradant la qualité de la combustion donne lieu à des émissions de polluants supplémentaires à celles dues à ces facteurs pris séparément.

8. COMMENT REDUIRE LES EMISSIONS POLLUANTES ?

Quatre voies sont possibles pour réduire les émissions de polluants :

- l'amélioration de l'efficacité énergétique. Elle permet de diminuer les consommations de bois de façon significative ; les émissions pour un même besoin en chauffage sont donc moins importantes,
- la réduction des émissions à la source ou réduction primaire qui consistent à améliorer les performances environnementales (qualité de la combustion) des appareils,
- l'installation de dispositifs sur les appareils existant, permettant de réduire les émissions de polluants,
- l'installation, l'entretien et l'utilisation de l'appareil.

8.1. L'AMELIORATION DES RENDEMENTS ENERGETIQUES

Tous les dispositifs, décrits dans le paragraphe suivant, en permettant d'améliorer la qualité de la combustion ou de brûler plus complètement le combustible et les gaz combustibles qui s'en échappent, participent à une augmentation du rendement énergétique des appareils. L'augmentation des performances énergétiques va donc globalement de pair avec une augmentation des performances environnementales.

En complément des améliorations apportées sur les appareils pour accroître les performances environnementales, d'autres dispositions peuvent être prises pour améliorer le rendement énergétique :

- l'utilisation d'un échangeur à contact indirect et d'un ventilateur (ayant une faible consommation électrique) permettant de favoriser l'apport d'air chaud dans la pièce à chauffer, ce qui complète le mode de chauffage classique par convection et rayonnement. Un certain nombre d'appareils intègre déjà ce type de dispositif qui permet de gagner quelques points de rendement,
- L'utilisation d'un accumulateur de chaleur permettant de stocker la chaleur générée par la combustion d'une charge de bois et de la restituer lors de la phase ralentie ou d'arrêt de l'équipement. La combustion du bois est ainsi opérée dans des conditions optimales avec des émissions réduites. Dans certaines conditions, des accumulateurs peuvent être installés sur des équipements existants. Disposer d'un système d'accumulation de chaleur accroît considérablement les rendements énergétiques qui sont alors supérieurs à 80%.

8.2. LA REDUCTION DES EMISSIONS A LA SOURCE :

Environ 80% des émissions polluantes ont lieu durant les 10 à 15 minutes après l'allumage de la charge. Réduire ce pic de pollution conduit donc à une réduction drastique des émissions polluantes.

Un certain nombre de technologies permettent de minimiser la formation de particules. Il s'agit :

- **des appareils à combustion catalytique,**
- **des appareils à combustion avancée (non catalytique),**
- **des poêles de masse,**
- **des poêles à granulés,**
- **des chaudières domestiques.**

8.2.1. LES APPAREILS A COMBUSTION CATALYTIQUE

Les appareils à combustion catalytique ont connu un large développement aux USA. Ils permettent une oxydation catalytique d'un certain nombre de composés dont le monoxyde de carbone et les composés organiques constituant la fraction condensable des particules.

Aux USA, ces appareils tendent à être supplantés aujourd'hui par des appareils certifiés EPA qui présentent des perfectionnements permettant une amélioration de la combustion mais dont l'entretien est plus aisé et dont les performances sont mieux conservées dans le temps. Pour compenser la faible durée de vie des catalyseurs estimée entre 5 et 7 ans (en fonction du taux d'utilisation des appareils) et anticiper la dégradation de leurs performances dans le temps, des valeurs limites en particules (certification) plus contraignantes au moment de leur mise sur le marché, sont d'ailleurs associées aux appareils à combustion catalytique aux Etats Unis. Très peu d'appareils catalytiques sont commercialisés sur le territoire français.

8.2.2. LES APPAREILS A COMBUSTION AVANCEE

Les appareils sont actuellement conçus de manière empirique à partir de l'expérience de chaque constructeur. En particulier la répartition des débits d'air primaire, secondaire et air de vitre, ainsi que le positionnement de ces entrées d'air sont définis moyennant la réalisation d'essais permettant d'orienter les choix et de positionner les performances du nouvel appareil par rapport aux exigences du label Flamme Verte. Le débit global d'air comburant entrant et la répartition des débits entre air primaire, secondaire et air de vitre sont méconnus. De plus, les appareils ne possèdent aucune régulation d'air, même simple.

Le projet Identech, 2017 met en évidence l'impact important de certains paramètres sur les performances environnementales et énergétiques des appareils :

- La suppression de l'air de grille (hors allumage et/ou fin de combustion). Cet air primaire qui arrive par la grille sous les bûches ne permet pas une gestion contrôlée de la vitesse de dégradation de la bûche et participe ainsi à l'émission de polluants : lorsque la vitesse de combustion devient trop importante, les débits d'air sont trop faibles et des imbrûlés sont émis (fort niveau de CO en début de combustion). De même, cet air de grille participe à l'augmentation des émissions en entraînant des particules de cendres dans les fumées,
- L'excès d'air : il ne doit pas être trop élevé pour éviter de refroidir le foyer (les points froids étant à l'origine de la formation de particules de suies) tout en étant suffisant pour oxyder correctement les composés à brûler,
- La répartition de l'air entrant dans la chambre : l'air distribué est réparti de façon adéquate dans l'espace et dans le temps pour d'une part allumer la charge et maintenir de façon stable dans le temps la pyrolyse du bois, et d'autre part pour brûler les gaz de pyrolyse,
- La température : des niveaux de température suffisants sont nécessaires afin d'obtenir une bonne qualité de combustion mais il est aussi très important d'obtenir des températures suffisamment homogènes afin d'éviter d'éventuelles zones froides productrices d'imbrûlés (suie notamment),
- Le temps de séjour : il s'agit ici de laisser un temps suffisant (en général, 2 secondes) pour que les gaz issus de la pyrolyse et l'oxygène de l'air se rencontrent afin de réagir. Les dimensions des différents appareils doivent intégrer cette exigence, Le positionnement adapté du ou des déflecteurs et des différentes entrées d'air (secondaires et air de vitre notamment) doit faciliter la recirculation des fumées dans la chambre afin d'utiliser l'ensemble du volume et d'augmenter le temps de séjour,

- La conception de l'appareil favorise l'écoulement et l'orientation de l'air entrant et des fumées dans la chambre,
- L'apport d'air secondaire : le débit de gaz secondaire doit être suffisant pour brûler les gaz de pyrolyse produits. Le débit d'air secondaire injecté étant constant au cours du temps, il est souhaitable d'avoir une combustion la plus progressive possible pour produire toujours le même débit de gaz de pyrolyse,
- La température de l'air tertiaire entrant dans la chambre doit être ni trop basse ni trop élevée. Dans le premier cas, la chambre est refroidie par l'apport d'air trop froid, favorisant la formation d'imbrûlés. Dans le second cas, la densité de l'air diminue fortement, occasionnant un plus faible apport en oxygène pouvant créer un manque d'oxygène avec pour conséquence la formation de CO,
- La turbulence : ce point est important car il s'agit de mélanger en tous points les gaz issus de la pyrolyse du bois et l'oxygène de l'air afin de favoriser les réactions d'oxydation,
- Les matériaux employés permettent de maintenir de hautes températures dans la chambre de combustion. Différents matériaux peuvent être utilisés : isolants tel que la vermiculite ou ayant une capacité à accumuler la chaleur tels que la fonte ou la brique,
- L'étanchéité des appareils : les arrivées d'air froides non maîtrisées, favorisent la formation de particules de suies, d'où l'intérêt de disposer d'appareils relativement étanches. Par ailleurs, l'utilisation d'un déflecteur étanche sur les côtés et le fond de la chambre permet d'éviter le passage de gaz imbrûlés. Enfin, l'utilisation d'appareils dans des maisons étanches nécessite l'étanchéité même de celui-ci pour obtenir une combustion maîtrisée.

La régulation de fonctionnement étant inexistante sur ces appareils, leur bon dimensionnement est un facteur clé pour obtenir une bonne combustion.

Parmi tous ces paramètres, la maîtrise de la combustion primaire est essentielle. Elle doit permettre une génération de gaz de pyrolyse régulière dans le temps (de façon à éliminer le pic d'émission de polluants après chargement de l'appareil ou l'emballement de la combustion). Ces gaz de pyrolyse sont ensuite brûlés au niveau de la combustion avec un apport d'air juste nécessaire pour obtenir une combustion chaude et optimisée avec de faibles émissions de particules et un rendement maximum.

8.2.3. LES POELES DE MASSE OU A ACCUMULATION LENTE DE CHALEUR

Ces poêles sont conçus pour emmagasiner l'énergie produite lors de la combustion et pour la restituer lentement la chaleur dans la pièce à chauffer, jusqu'à 24 h après la fin de la combustion.

Bien conçus et du fait de leur grande capacité à restituer la chaleur, ces poêles fonctionnent en général peu de temps par jour, uniquement à allure nominale. Compte tenu de ces éléments (fonctionnement à allure nominale, isolation du foyer), des températures élevées peuvent être atteintes dans la chambre de combustion, elles permettent d'éliminer bon nombre de composés organiques lourds constituant la fraction condensable des particules.

La distribution et la répartition de l'air primaire et secondaire sont des paramètres importants pour atteindre de bonnes performances environnementales.

8.2.4. LES POELES A GRANULES

Ces équipements sont parmi les plus performants du marché, tant sur le plan énergétique qu'environnemental.

Ces appareils permettent d'obtenir des rendements élevés (environ 90%) grâce à un bon mélange et un ratio air comburant et combustible, la faible taille des granulés favorisant le passage de l'air, et d'une alimentation automatique en combustible. Les performances de ces appareils peuvent être sensiblement accrues par l'emploi d'une bonne régulation du débit d'air entrant.

Les performances des poêles à granulés constatées sont en général élevées mais restent très disparates d'un appareil à l'autre en fonction de leur conception, et surtout à faible allure (BeReal, 2016).

Une amélioration des connaissances des émissions de ces appareils est donc souhaitable. La dégradation des performances de ces appareils dans le temps est également méconnue.

8.2.5. LES CHAUDIERES DOMESTIQUES

Quelles que soient les chaudières : à granulés, à bûches ou à plaquettes, ces installations se caractérisent par de meilleures performances énergétiques et environnementales que les appareils précédents.

Elles disposent notamment :

- D'un chargement automatisé en combustible en fonction du besoin en chauffage du logement (température de retour d'eau),
- D'une régulation automatisée de l'excès d'air, par la mise en place d'une mesure de la teneur en O₂ en sortie de la chambre au moyen d'une sonde Lambda. Cette solution permet d'adapter l'apport d'air quel que soit l'allure de fonctionnement,
- D'un échangeur de chaleur performant permettant de chauffer l'eau nécessaire au chauffage du logement,
- D'un dispositif d'extraction automatisé des cendres.

La fraction condensable des particules à l'émission des chaudières est en général très faible (de l'ordre de quelques mg/m³₀).

8.3. LES TECHNIQUES DE REDUCTION DES EMISSIONS A INSTALLER SUR LES APPAREILS EXISTANT (PEREN2BOIS, 2012, ERFI, 2017)

En plus des techniques primaires de réduction intégrées aux appareils nouveaux, des dispositifs (tableau 1 en Annexe) peuvent être installés *a posteriori* sur des appareils existants. Ceux-ci peuvent :

- **agir pour améliorer la combustion avec pour conséquence la réduction des polluants ; et peuvent donc être qualifiés de techniques primaires, par exemple :**
 - un échangeur air/braises, permettant de générer un air secondaire dans le foyer, compatible avec les foyers ouverts et à porte escamotable.
 - un extracteur visant à réguler le tirage indépendamment des conditions météorologiques, et à améliorer la combustion notamment dans les phases d'allumage ; compatible avec les foyers fermés,
 - un système de plaque métallique installée dans le fond de la chambre de combustion, et qui permet de générer un air tertiaire dans le foyer ; compatible avec les foyers fermés.

- des capteurs magnétiques installés à l'arrière du poêle censés surveiller la combustion, et d'un système de communication, reliés en Bluetooth à un smartphone ou un tablette numérique équipée d'une application permettant à l'utilisateur d'être conseillé sur la gestion de la combustion, compatible avec les foyers fermés.

Les différentes techniques disponibles sur le marché Européen, sont présentées en annexe.

- **Intervenir au niveau du conduit d'évacuation des fumées pour éliminer les polluants émis : électrofiltres, filtre catalytiques, etc., ces techniques sont qualifiées de secondaires. Deux familles de techniques secondaires sont commercialisées, il s'agit des filtres électrostatiques et catalytiques.**

Les électrofiltres s'installent dans le conduit ou en toiture. Le dispositif procède au chargement des particules grâce à une électrode portée à une haute tension puis à leur collecte sur une seconde électrode. Cette technologie est très courante dans l'industrie. Dans le cas du chauffage domestique au bois, des concepts simples avec une seule électrode installée dans le conduit de fumée existent sur le marché. Cette technique s'utilise en combinaison avec des foyers ouverts, des inserts, des poêles et des chaudières, il s'agit de la technique la mieux caractérisée à ce jour. Les dispositifs ont une action sur la fraction solide des particules (efficacité supérieure à 50%) ; en revanche, ils ont une efficacité limitée sur la fraction condensable qui est fortement dépendante de la température des fumées lors de la filtration. Cela peut être contrebalancé en plaçant un électrofiltre en toiture afin de bénéficier de températures de fumées plus faibles, ce qui favorise la condensation des espèces organiques dans le conduit avant filtration et permet d'abattre une partie des condensables, ce qui n'est pas possible si l'électrofiltre est placé en sortie d'appareil. A ce jour, trois électrofiltres sont commercialisés en Europe (Annexe).

Dans le cas des filtres catalytiques, une surface catalytique active est créée sur un support matériel (céramique, acier inoxydable). L'objectif de ces systèmes catalytiques est la réduction des polluants gazeux, CO, C_xH_y en CO₂, ce qui peut représenter un intérêt pour réduire la fraction condensable et les précurseurs d'aérosols organiques secondaires. Ils n'ont pas vocation à agir sur la fraction solide des particules.

Ces techniques présentent deux difficultés majeures :

L'efficacité du catalyseur dépend de la température (il faut atteindre un certain niveau de température pour obtenir une meilleure efficacité). Certaines conditions de fonctionnement peuvent nécessiter une adaptation pour pallier les faibles températures de fumées, par l'installation d'un by-pass qui a l'inconvénient de limiter l'usage du filtre catalytique aux périodes les moins émissives, ou en préchauffant le pain catalytique, à l'aide d'une résistance chauffante, ce qui permet un fonctionnement sur une plus large gamme de températures, mais nécessitent une alimentation électrique

D'une façon générale, une attention particulière devra être portée aux pertes de charge occasionnées par ces dispositifs. Une perte de charge trop importante peut perturber le tirage naturel et à minima dégrader la qualité de la combustion. Certains de ces dispositifs nécessitent donc d'être utilisés en association avec un ventilateur de tirage.

Trois filtres catalytiques sont à ce jour commercialisés sur le marché Européen (voir Annexe). Les filtres catalytiques n'ont pas d'efficacité sur la fraction solide, mais permettent une réduction des émissions de CO, de COVT et de la fraction condensable des particules.

Ces techniques émergentes présentent encore des contraintes importantes en termes :

- d'installation dans ou en sortie du conduit du fumées (absence de législation en vigueur, formation adéquate des opérateurs). Certains équipements (électrofiltre) renferment de la haute tension, les risques électriques associés ne sont pas pris en compte par la législation en vigueur,
- de positionnement qui doit être adapté de façon à obtenir une bonne efficacité (température suffisante pour le fonctionnement du catalyseur) ou de façon à ne pas détériorer le filtre (distance minimale du foyer pour éviter une surchauffe pour l'électrofiltre),
- d'accès : bon nombre de logements ne sont à l'heure actuelle pas conçus pour accueillir un tel dispositif. Tous ces équipements nécessitent de disposer d'un accès pour leur entretien,
- d'exploitation : ces dispositifs peuvent présenter des risques élevés d'encrassement prématuré en fonction des conditions d'utilisation, nécessitant des nettoyages fréquents. Ils nécessitent un ramonage plus fréquent du conduit, rendu plus technique en raison de la nécessité du démontage et de la remise en place du dispositif de filtration,
- de durée de vie : peu de données sont disponibles. La durée de vie des catalyseurs primaires (intégré dans le foyer) est estimée entre 5 et 7 ans aux Etats Unis en fonction de l'utilisation faite de l'appareil. A priori ces dispositifs secondaires devraient avoir une durée de vie similaire.
- esthétique, que ces techniques soient placés à l'intérieur ou à l'extérieur du logement,
- économique, tant en termes d'investissement et d'installation, que d'exploitation (ramonage plus fréquent, entretien régulier, remplacement des parties les plus sensibles),
- d'efficacité, dont l'évaluation reste à l'heure actuelle majoritairement limitée à des conditions optimales de fonctionnement (étude menée en laboratoire) ; leur efficacité en conditions réelles sur de longues périodes est mal connue.

Leur mise en œuvre peut requérir des évolutions réglementaires sur les points suivants :

- l'installation du haut voltage dans l'habitat dans le cas des électrofiltres,
- les systèmes de by-pass dans le cas de la mise en œuvre des catalyseurs ne fonctionnant pas en tirage naturel,
- l'habilitation du personnel installant et entretenant ces dispositifs,
- la définition des référentiels d'évaluation pour l'ensemble des dispositifs de réduction.

Un bilan du positionnement des techniques commercialisées en Europe, vis à vis de la réglementation actuelle, est fourni en Annexe (tableau 7). En cas d'absence de texte réglementaire le constructeur d'un dispositif peut demander un avis technique qui permettra, s'il est favorable, la commercialisation du produit.

S'agissant du retour d'expérience des utilisateurs et des effets induits par ces dispositifs, des tests en laboratoire ou en sites réel, et des enquêtes ont permis de collecter des informations relatives aux points suivants :

- efficacité sur le long terme,
- entretien (au quotidien et lors des ramonages),
- consommation électrique,
- refoulement dans l'habitat,
- détériorations de l'habitat,
- nuisances sonores,
- l'impact sur le confort thermique et le rendement de l'appareil de chauffage,
- risque de corrosion des conduits.

Le Tableau 8 en annexe présente, pour les dispositifs identifiés sur le marché Européen, l'ensemble des informations collectées relatives aux effets induits et aux retours d'expérience des utilisateurs.

En conclusion, les techniques de réduction à installer sur les appareils existant sont prometteuses en termes d'efficacité (Peren2bois 2012, ERFI 2017) et évoluent rapidement mais présentent encore des contraintes importantes. Par ailleurs, des interrogations demeurent concernant ces techniques, sur l'efficacité à long terme, l'entretien, et les effets induits par ces systèmes.

Ces questionnements devront être levés avant une mise en œuvre à grande échelle. Compte tenu de ces contraintes, ces dispositifs auraient vocation à être installés dans des logements neufs, conçus pour accueillir ces équipements, et par défaut équipés d'appareils de chauffage déjà relativement performants. Or, ils trouvent leur intérêt dans les contextes où le renouvellement n'est pas envisageable. Un déploiement massif n'est donc pas envisageable pour l'instant d'autant qu'ils ne permettent pas l'amélioration des rendements énergétiques.

En attendant de disposer de techniques plus adaptées aux habitations existantes, il convient de continuer à améliorer les performances environnementales et énergétiques des appareils mis sur le marché.

Le déploiement de ces techniques de réduction des émissions de polluants, s'il a lieu, devra s'accompagner de la promotion de bonnes pratiques relatives à l'utilisation du chauffage domestique au bois. En effet, malgré l'efficacité de ces dispositifs de réduction, leur action ne saurait pallier des niveaux d'émissions très élevés générés par de très mauvaises conditions de combustion qui de plus, risqueraient d'affecter leur efficacité sur le long terme.

8.4. UNE INSTALLATION, UN ENTRETIEN ET UNE UTILISATION CORRECTE

L'emploi des meilleures technologies est une condition nécessaire mais pas suffisante pour réduire les émissions de particules. En effet cette action sur les appareils nécessite d'être accompagnée d'une information des utilisateurs et des différents acteurs, concernant les enjeux d'utilisation aussi bien énergétiques qu'environnementaux de ce mode de chauffage.

La démarche devra donc s'accompagner d'autres mesures telles que :

- **la formation des installateurs**

Les installateurs jouent un rôle clef sur trois points importants :

- Le dimensionnement du foyer (choix de la puissance de l'appareil). Si l'installation est surdimensionnée par rapport aux besoins énergétiques du logement afin de faire face aux pics de froid par exemple, l'appareil fonctionnera la plupart du temps à allure réduite,
- Le fonctionnement optimal du foyer, en vérifiant que le tirage de l'installation n'est pas excessif et si c'est effectivement le cas, d'équiper le conduit d'un régulateur de tirage. Dispositif qui, au moyen d'un volet d'entrée d'air, va réduire le tirage au niveau du foyer. Sans ce dispositif, l'utilisateur aura tendance à obturer les entrées d'air afin de limiter la consommation de bois. Une visite technique chez le particulier est nécessaire pour recueillir ces informations.

- **l'information des fournisseurs de bois de chauffage**

L'humidité du bois participe à détériorer la qualité de la combustion et donc à l'augmentation des émissions de particules. Cette humidité peut être aisément contrôlée au moyen d'un hygromètre.

- **l'information des utilisateurs**

L'efficacité de la combustion est aussi souvent limitée par un manque d'information des utilisateurs sur les bonnes pratiques en matière de fonctionnement et d'entretien d'un appareil. Cette information est d'autant plus nécessaire que les appareils récents, du fait de leur étanchéité et de leurs nombreuses arrivées d'air, sont bien plus sensibles aux conditions d'utilisation que les appareils plus anciens (Afac, 2016 ; Brandelet, 2016).

Outre l'installateur, le constructeur de l'appareil joue également un rôle important dans l'information de l'utilisateur. En effet, ce dernier doit pouvoir bénéficier d'une notice claire, schématique de mise en route rapide de l'appareil. Cette notice devrait en particulier décrire :

- la conduite à tenir (réglage des entrées d'air) lorsque des essences dures telle que le chêne sont brûlées,
- les conseils afin d'éviter le recours trop fréquent à une réduction des entrées d'air, en expliquant par exemple qu'une réduction de l'allure peut aussi être obtenue par une diminution de la charge.

Enfin, quelques pratiques mériteraient d'être supprimées de certaines notices telles que l'augmentation de la charge à faible allure si les performances de l'appareil ne sont pas connues à cette allure.

D'autres pratiques telles que le mode d'allumage par le haut qui permettrait (ERFI, 2017) de réduire lors des allumages à froid de 30 à 50% des émissions polluantes sur un cycle complet de combustion, sont quant à elles à promouvoir auprès des utilisateurs.

Cette information doit être réalisée avec la participation de tous les acteurs concernés par cette problématique en France, afin de rendre cohérent et homogène le discours à faire passer auprès de la population.

9. IMPACT DES POINTS PRECEDENTS ET PROSPECTIVES

9.1. ROBUSTESSE DES FACTEURS D'EMISSION

Denier Van Der Gon et al., 2015, qui utilisent les facteurs d'émission des inventaires en tant que données d'entrée des modèles de « chimie transport » souligne une sous-estimation importante des émissions, en particulier en hiver dans les régions où la combustion résidentielle du bois est très utilisée, qui s'explique par l'utilisation d'une méthode de mesurage inappropriée (lorsque un simple mesurage de la fraction solide est effectué), le manque de représentativité de certains essais et la non prise en compte de la part des émissions pouvant former des aérosols secondaires.

Pour pallier cela et comme déjà mentionné ci-dessus, la détermination de facteurs d'émission de particules doit s'appuyer sur :

- l'utilisation d'une méthode et d'un protocole de mesure appropriés (cf. méthodes DT ou SPC mises en œuvre sur des cycles complets de combustion),
- la prise en compte des conditions réelles d'utilisation des appareils, en faisant notamment varier les paramètres ayant une influence sur les émissions de particules tels que l'allure de fonctionnement de l'appareil, l'essence de bois, etc.
- et une sélection d'appareils représentatifs du parc en termes d'âge, de technologie employée, etc.

A ce jour en France, les facteurs d'émission moyens pris en compte pour les inventaires par le CITEPA n'incluent pas autre chose que la fraction solide et ne sont pas basés sur des tests réalisés dans des conditions proches des usages réels.

Outre ces différents éléments, déjà retenus lors de nos précédentes études visant à établir des facteurs d'émission de polluants (INERIS, 2002 ; Afac, 2016), il conviendrait également de :

- prendre en compte le vieillissement des appareils en comparant par exemple les performances d'appareils neufs et de ceux déjà utilisés depuis plusieurs années,
- tenir compte de l'interaction entre les paramètres testés : la présence simultanée de plusieurs facteurs aggravant la qualité de la combustion peut donner lieu à des émissions de polluants supplémentaires à celles dues à ces deux paramètres pris séparément,
- mieux cerner la validité et la représentativité des résultats obtenus en caractérisant certains paramètres ayant une influence directe sur la qualité de la combustion tels que l'étanchéité, l'excès d'air, l'allure testée par rapport à l'allure nominale définie par le constructeur notamment.

Lors des tests visant à établir des facteurs d'émission, les mesurages étant effectués directement en sortie des appareils, les résultats obtenus ne reflètent pas les teneurs et la composition chimique des particules, observés dans l'air ambiant du fait de la formation d'aérosols secondaires entre l'émission et l'air ambiant.

9.2. QUELS NIVEAUX DE PERFORMANCES POUR LES FUTURS APPAREILS

Le projet Eu-Ultra Low Dust a réalisé une synthèse des politiques appliquées dans différents pays Européens en termes de valeurs limites, de labellisation et s'est intéressé aux meilleures techniques disponibles (MTD) de réduction des émissions (deux techniques primaires et une technique secondaire) des appareils de chauffage domestique au bois. Dans ce projet, différents scénarii de prévision de déploiement des MTD d'ici à 2050 ont été établis basé et les niveaux d'émissions associés évalués pour les TSP.

A plus court terme, une réduction importante des émissions de particules ne pourra être obtenue durablement que par la mise sur le marché d'appareils performants sur les plans environnemental et énergétique, c'est-à-dire ayant de faibles émissions aux allures nominale et réduite, quelle que soit l'essence brûlée et sans influence notable des conditions d'utilisation sur la performance.

Pour mieux appréhender les performances des futurs appareils, il est intéressant de connaître les performances des appareils vendus dans les pays qui ont mis en place une réglementation précoce qui s'appuie sur des normes qui prennent en compte lors des tests la mesure des fractions solide et condensable (via la méthode du tunnel à dilution) et les différentes allures de fonctionnement des appareils.

C'est en particulier le cas des Etats-Unis/Canada et de la Norvège, qui fixent une valeur limite en particules totales pour les appareils mis sur le marché depuis respectivement 1990 et 1998.

Les niveaux actuels d'émission en particules totales (fractions solide et condensable) des meilleurs appareils vendus en Norvège et aux Etats-Unis/Canada sont de l'ordre de 1 à 2 g/kg de bois sec brûlé (Sintef, 2012 ; OMNI, 2011). Les émissions de COVT et de NO_x de ces appareils sont également faibles tout en conservant un rendement élevé. Les performances environnementales et énergétiques élevées de ces appareils sont bien maintenues quelles que soient les conditions d'utilisation (différentes allures, différentes essences, différentes charges) tout en restant simples à utiliser (absence de régulation électronique) et accessibles financièrement. A condition de ne pas tenir compte de la combustion du chêne qui nécessite des réglages particuliers d'entrées d'air, les meilleurs appareils français se situent aux alentours de 3 à 4 g de particules totales par kg de bois sec brûlé (Afac, 2016 ; Identech, 2017).

Une réduction des particules totales émises par les appareils mis sur le marché français d'un facteur 3 est donc atteignable en améliorant la conception des appareils.

A l'instar de ces pays, une telle réduction ne pourra être atteinte tant que des tests à allure réduite (allure largement utilisée par les particuliers) ne sont pas menés et pris en compte pour l'obtention du label Flamme Verte. Cela devrait permettre d'éviter de mettre sur le marché des appareils uniquement optimisés pour un fonctionnement à allure nominale et qui à allure réduite émettent 3 à 5 fois plus de particules. Ceci est vrai pour les appareils à bûches mais également pour les appareils à granulés. Notons que la dernière version du projet de norme européen prEN 16510-1 décrit la réalisation de tests à charge partielle mais ces derniers ne sont pas obligatoires. Ils ne le seront pas non plus dans le cadre de l'application de la Directive Eco-design.

Ces performances élevées peuvent être atteintes :

- en restreignant le domaine d'utilisation des appareils de façon à éviter des allures très réduites et très émissives,

- et en améliorant la conception des appareils. L'objectif est d'obtenir une combustion chaude et progressive avec un excès d'air juste suffisant. La gestion des entrées d'air est alors primordiale afin d'éviter le pic d'émission de polluants lors de l'allumage, les particules totales étant essentiellement émises lors de cette phase. Pour cela, un minimum de régulation des entrées d'air notamment en tout début de combustion est probablement nécessaire,

enfin, même sur des appareils performants, de forts niveaux d'émission peuvent être observés si ceux-ci sont utilisés dans de mauvaises conditions. Une autre voie possible pour réduire les émissions polluantes est donc de favoriser l'utilisation d'appareils qui nécessitent le moins possible l'intervention d'un opérateur, via une régulation simple des entrées d'air par exemple en fonction de l'avancement de la combustion. Ce type de technologie a été testé dans le projet EU Ultra Low Dust.

10. QUEL IMPACT SUR LES EMISSIONS D'UN RENOUVELLEMENT DU PARC ?

10.1. REMPLACEMENT DES FOYERS OUVERTS

Peu de données sont actuellement disponibles pour les foyers ouverts. Les émissions, notamment de particules totales, de ces foyers seraient sensiblement supérieures à celles des foyers fermés. **Lors d'un remplacement d'un foyer ouvert par un foyer fermé, un gain en termes d'émission de particules d'un facteur 3 à 4 est à attendre, à quantité d'énergie délivrée à l'utilisateur équivalente, du fait essentiellement des écarts de rendement observés entre ces deux types de foyers.**

10.2. REMPLACEMENT DES FOYERS FERMES ANCIENS

La réduction des émissions de particules totales (fraction solide et condensable) constatée sur des appareils neufs entre 1998 et 2012 est d'environ 35% en Norvège soit 2,5% par an, ce qui correspond à une diminution relative similaire à celle observée sur les appareils français entre 2001 et 2015 (Afac, 2016).

Rappelons que ces données obtenues sur des appareils neufs ne prennent pas en compte la détérioration au fil du temps des performances des appareils étanches actuellement vendus, du fait des contraintes thermiques auxquelles ils sont exposés, qui peuvent engendrer une augmentation significative des émissions de particules totales (Sintef, 2013).

La performance moyenne actuelle des appareils neufs vendus en Norvège en termes d'émissions de particules (3,8 g/kg de bois sec brûlé environ en 2012) est supérieure à celles des appareils neufs français (environ 5 à 6 g/kg, Afac, 2016).

La trajectoire actuelle de réduction des émissions de particules totales constatées sur les appareils neufs (2,5% par an) n'est donc pas susceptible d'évoluer significativement dans le futur. Compte tenu de la dégradation des performances des appareils constituant le parc, du fait de leur vieillissement et de leur longévité, l'impact du renouvellement des appareils à bûches sur la qualité de l'air devrait donc rester modéré dans les années à venir sauf si des appareils performants (1 à 2 g/kg de bois sec brûlé) sont rapidement développés et mis sur le marché par les fabricants français.

11. PART ATTRIBUABLE AU AU CHAUFFAGE AU BOIS DANS LA POLLUTION AUX PARTICULES FINES : QUELS MARQUEURS UTILISER ?

11.1. MARQUEURS PARTICULAIRES

Différents composés particuliers sont communément utilisés pour l'estimation de la contribution de la combustion de biomasse. Parmi ces marqueurs, on retiendra les sucres anhydrides, et en particulier le lévoglucosan et ses isomères (mannosan et galactosan) en tant que produits de dégradation de la cellulose (Simoneit et al., 1999). D'autres composés chimiques peuvent être considérés tels que ceux issus de l'altération thermique de la lignine comme les dérivés guaiacyl et syringyl (Nolte et al., 2001). Comme le lévoglucosan et ses isomères (Fine et al., 2002), ils offrent également la possibilité de distinguer les combustions de bois tendres de celles de bois durs. Le bois tendre ou résineux regroupant les conifères présente une proportion élevée en produits dérivés de guaiacyl alors que le bois dur ou feuillu est enrichi en produits dérivés syringyl (Rogge et al., 1998, Simoneit et al., 1993). Cette distinction reste toutefois qualitative et difficile à opérer sur des échantillons d'air ambiant.

Plusieurs espèces inorganiques sont également reconnus comme marqueurs de combustion de biomasse, en particulier le potassium (Favez et al., 2009). Par ailleurs, il est aujourd'hui possible d'utiliser les propriétés optiques des aérosols pour déterminer la part de carbone suie provenant de la combustion de biomasse (BC_{bb}). Pour ce faire, il convient de mesurer l'absorption de la lumière visible par les particules à différentes longueurs d'onde, tel que proposé par Sandradewi et al. (2008).

Certains autres composés organiques, tels notamment que les méthyl-nitrocatechols, sont considérés comme marqueurs des AOS provenant des émissions de combustion de biomasse (plus spécifiquement de la photooxydation des composés phénoliques) (Linuma et al., 2010). La mesure dans l'air ambiant et l'utilisation de ce type de composés permet donc d'évaluer la part de l'AOS issu de la combustion de biomasse (Srivastava et al., 2018).

Malgré la diversité des traceurs potentiels, il reste aujourd'hui difficile de quantifier la part des PM en air ambiant directement imputable au chauffage au bois. Ainsi, par exemple, les mesurages réalisés dans le cadre du projet Champrobois, 2014 montrent clairement que le lévoglucosan est émis majoritairement lors de phases particulières de combustion. Des émissions fortes de lévoglucosan peuvent avoir lieu sur des périodes très courtes au cours d'un cycle de combustion. Ce comportement n'est en outre, pas en phase avec d'autres types de composés émis, et notamment d'imbrulés lourds (HAP, BC_{bb}). En conséquence, l'utilisation de ce composé en tant que traceur de la combustion de bois dans les atmosphères ambiantes demeure un moyen d'appréhender l'évolution des conditions de combustion du bois mais mériterait d'être associé à d'autres indicateurs pour parfaire la détermination de la part attribuable à cette source.

De plus, il existe encore certains manques afin de discriminer différentes sources de combustion de biomasse. Ceci est par exemple le cas pour la distinction du chauffage domestique au bois et du brûlage de déchets verts. Ainsi, dans le cadre du projet SODEMASS, en cours de réalisation, des marqueurs ou signatures chimiques spécifiques seront recherchés en utilisant notamment des approches de caractérisation chimique traditionnelles ciblées mais aussi, grâce notamment aux techniques de spectrométrie de masse haute résolution, des approches de caractérisation chimiques non ciblées.

11.2. MARQUEURS GAZEUX

L'influence du chauffage au bois sur la qualité de l'air peut également être observée via le suivi de certains composés gazeux. A titre d'illustration, la figure ci-après montre les rejets en méthanol, acétonitrile et benzène d'un foyer à bois lors d'un essai réalisé dans le cadre de Champrobois.

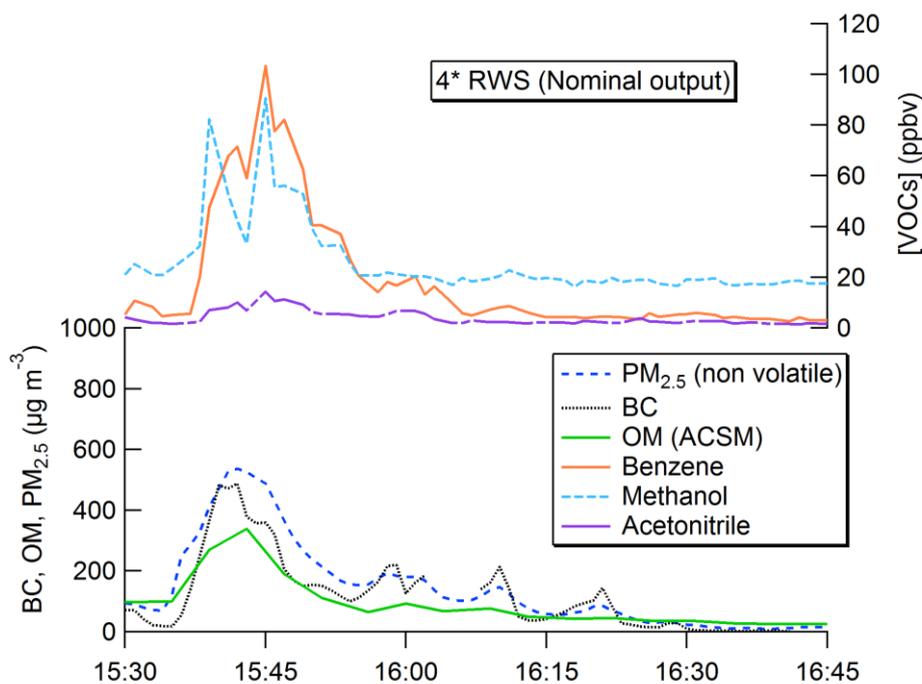


Figure 7 : Evolution des teneurs en benzène, méthanol et acétonitrile (panneau du haut) et du BC, PM_{2.5} (non volatile) et matière organique (OM) lors de tests d'un appareil Flamme verte 4* à allure nominale (Champrobois, 2014, Albinet et al., 2015).

On peut noter que les concentrations en acétonitrile sont bien plus faibles que celles des deux autres espèces alors que ce composé est parfois utilisé comme unique traceur de la combustion de biomasse lors de travaux de recherche. En outre, son émission est nettement moins importante à allure réduite qu'à allure nominale, laissant supposer que son utilisation comme traceur gazeux universel des émissions de combustion de biomasse engendre un risque de mauvaise prise en compte des émissions à allure réduite.

Ainsi, plutôt que de se focaliser sur un composé spécifique, la signature chimique d'un ensemble de COV individuels émis par la combustion de biomasse peut être utilisée afin d'estimer cette source dans l'air ambiant à partir du suivi des leurs concentrations dans l'air ambiant et la détermination des profils d'émission de ces composés (Baudic et al. 2016).

12. QUEL IMPACT DU CHAUFFAGE AU BOIS SUR LA QUALITE DE L'AIR INTERIEUR ?

L'air intérieur constitue un axe fort de progrès en santé environnement. La multiplicité des sources d'émission potentielles ainsi que le temps passé dans les espaces clos (en moyenne 70 à 90 %, dont 16 heures par jour dans son logement) en font une préoccupation légitime de santé publique. Si les matériaux de construction, le mobilier, les produits de consommation, certaines activités de la vie courante sont des sources d'émission de polluants en air intérieur, le chauffage au bois en est également une. En effet, plusieurs études ont montré un impact du chauffage au bois sur les concentrations en air intérieur, notamment en comparant les concentrations mesurées dans des logements avec et sans fonctionnement du système de chauffage au bois. Elles montrent une influence majeure sur les concentrations en benzène et hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et notable pour les particules (PM₁₀ et PM_{2.5}) (BioIS, 2014), avec par exemple des concentrations en benzène dépassant la valeur guide d'air intérieur long-terme établie par l'Anses⁷ (2 µg/m³), voire la valeur d'action rapide du HCSP⁸ (10 µg/m³) en période de fonctionnement de l'appareil et des concentrations en HAP jusque 10 fois supérieures par rapport à celles mesurées sans fonctionnement de l'appareil (INERIS, 2008).

Dans le cadre du Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA) de la Vallée de l'Arve, un fonds d'aide expérimental pour la modernisation du parc d'appareils individuels de chauffage au bois a notamment été créé. Il vise à aider financièrement les particuliers pour changer leurs cheminées (foyers ouverts) ou anciens appareils de chauffage au bois (antérieur à 2002) par des appareils de chauffage au bois à bûches ou à granulés de performance équivalente au label Flamme verte 7 étoiles. Le gain de ces appareils en termes d'émissions dans l'air intérieur est peu documenté.

Dans ce contexte, en réponse à un appel à projet de l'ADEME (CORTEA 2015), l'INERIS a proposé le projet QAI-Arve ayant pour but d'étudier l'impact sur la qualité de l'air intérieur du changement d'une cheminée ou d'un appareil ancien par un appareil récent, performant et étanche. A notre connaissance, aucune étude française, sur un panel significatif d'habitation, basé sur des mesures comparatives de ce type n'a été identifiée dans la littérature. A cette fin, l'INERIS a recours à l'utilisation de kits de mesures indicatives, simple d'utilisation, en vue de permettre aux particuliers d'évaluer la concentration sur 7 jours en formaldéhyde, en benzène et en naphtalène dans 40 logements « avant et après » changement d'appareil.



⁷ Agence nationale de sécurité sanitaire. [Anses, 2008]

⁸ Haut conseil de la santé publique. [HCSP, 2010]

Ce projet, toujours en cours de réalisation, intervient en synergie d'un autre projet en cours de l'INERIS (CARVE) déjà financé par l'ADEME, dans la Vallée de l'Arve, ayant démarré mi 2014. Le projet CARVE a pour principal objectif d'évaluer l'impact du remplacement d'un appareil indépendant de chauffage au bois ancien par un appareil récent performant sur les émissions de particules dans l'air ambiant, en réalisant des mesures à l'émission sur quelques heures, *in situ*, avant et après renouvellement de l'appareil sur un nombre de sites significatif. Pour cela, il s'appuie sur la Confédération des Ramoneurs Savoyards, qui sera en charge des mesures à l'émission, les opérateurs ayant été formés au préalable par l'INERIS.

Le projet QAI-Arve profite donc de l'organisation, déjà mise en place pour le projet CARVE, entre l'INERIS et la Confédération des Ramoneurs Savoyards, pour déployer des mesures en air intérieur en parallèle des mesures à l'émission. Il bénéficie également de l'expérience acquise par l'INERIS sur l'impact des appareils de chauffage à bois sur la qualité de l'air intérieur au cours d'une précédente étude sur un panel de 6 habitations (INERIS, 2008), financée par l'ADEME, ainsi que dernièrement, lors d'une prestation de conseil de l'INERIS, en appui à une étude bibliographique réalisée par BioIS et commandée par l'ADEME, au sujet de l'impact sur la qualité de l'air intérieur de différents modes de chauffage.

13. CONCLUSIONS

BILAN DES CONNAISSANCES

Les particules issues, plus ou moins directement, des processus de combustion peuvent être divisées en deux catégories : primaires et secondaires.

- Les particules primaires incluent les particules présentes à l'état solide dans le conduit de cheminée et par convention la fraction dite condensable constituée d'espèces semi-volatiles organiques (COSV) dont le poids moléculaire est élevé et qui, par refroidissement hors du conduit forment des particules par condensation. La concentration de la fraction solide peut être quantifiée par simple collecte sur un filtre chauffé, alors que la quantification de la concentration de la fraction condensable requiert l'utilisation d'une méthode par piégeage dans un liquide approprié refroidi (méthode à barbotage) ou sur filtre après dilution des gaz (méthode du tunnel à dilution).
- Les particules secondaires se forment dans l'atmosphère après émission par des phénomènes de photooxydation, principalement à partir des précurseurs gazeux (composés organiques semi-volatils et volatils) les plus réactifs. Dans le cas de la combustion du bois, l'aérosol secondaire est très majoritairement de nature organique (aérosol organique secondaire ou AOS). Il n'existe à ce jour pas de méthode normalisée permettant de caractériser le potentiel de formation d'AOS d'une source.

Réduire la contribution de la filière combustion domestique de biomasse aux concentrations de particules dans l'air ambiant n'implique donc pas uniquement de réduire les émissions de particules solides, mais surtout celles de la fraction condensable qui comprend les HAPs (dont le BaP) ; et des COV incluant le benzène.

Une telle réduction, aura comme co-bénéfice la réduction des émissions de BaP et de benzène qui font également l'objet d'une surveillance dans l'air ambiant conformément aux directives 2004/107/CE et 2000/69/CE.

La fraction organique condensable et les COV peuvent largement être réduits par l'amélioration des conditions de combustion.

Ceci qui explique la quasi-inexistence de ceux-ci sur des installations de plus fortes puissances où les temps de séjour des gaz et particules sont plus conséquents et les niveaux de température plus élevés. L'amélioration des conditions de combustion intervient également sur le carbone élémentaire (EC) et organique (OC) de la fraction solide.

Sur un cycle complet, environ 80% des émissions polluantes ont lieu durant les 10 à 15 minutes après l'allumage à froid de la première charge bois ou à chaud des charges bois suivantes (rechargement).

Réduire ce pic de pollution pourrait donc conduire à une réduction drastique des émissions polluantes.

Un certain nombre de technologies permettent d'obtenir des performances énergétiques élevées tout en minimisant les émissions polluantes. Il s'agit :

- des appareils à combustion catalytique (peu utilisés en Europe),
- des appareils à combustion avancée (non catalytique),
- des poêles de masse,
- des poêles à granulés,
- des chaudières domestiques.

En France, mais également à l'étranger comme par exemple en Norvège, l'amélioration des performances des appareils neufs s'avère lente (réduction des émissions de particules de l'ordre de 2,5% par an lors des quinze dernières années). Le bénéfice de l'amélioration des performances des appareils neufs sur la qualité de l'air pourrait par ailleurs être amoindri, du moins en partie, par la dégradation dans le temps des performances de ces appareils, du fait de leur vieillissement et de leur longévité.

Or, des performances plus élevées pourraient être atteintes rapidement :

- en restreignant le domaine d'utilisation des appareils de façon à éviter des allures très réduites (combustion en défaut d'air conduisant à des phases très émissives).
- en améliorant la conception des appareils. L'objectif étant d'obtenir dans la phase de démarrage une combustion progressive en amenant l'excès d'air juste nécessaire pour assurer l'oxydation complète sans pour autant refroidir les gaz. La gestion des entrées d'air est donc primordiale afin d'éviter le pic d'émission de polluants lors de l'allumage, les particules totales étant essentiellement émises lors de cette phase. Pour cela, un minimum de régulation des entrées d'air notamment en tout début de combustion est probablement nécessaire.
- enfin, même sur des appareils performants, de forts niveaux d'émission peuvent être observés si ceux-ci sont utilisés dans de mauvaises conditions. Une autre voie possible pour réduire les émissions polluantes serait donc de favoriser l'utilisation d'appareils qui nécessitent le moins possible l'intervention d'un opérateur, via une régulation simple des entrées d'air par exemple en fonction de l'avancement de la combustion.

Les techniques de réduction (techniques primaires ou secondaires : électrofiltres, filtres catalytique etc) à installer sur les appareils existants, agissent pendant (dans la chambre de combustion) ou après (dans le conduit). Elles sont prometteuses en termes d'efficacité (Peren2bois 2012, ERFI 2017) et évoluent rapidement mais présentent encore des contraintes importantes d'intégration dans l'habitat. Par ailleurs, des interrogations demeurent concernant ces techniques, sur l'efficacité et le coût de maintenance à long terme, l'entretien, et les effets induits par ces systèmes. Ces questionnements devront être levés avant une mise en œuvre à grande échelle.

L'influence des paramètres de fonctionnement sur la qualité de la combustion et les émissions polluantes des appareils a fait l'objet d'une étude bibliographique récente (rapport INERIS DRC-17-164787-08043A) basée sur l'analyse d'une quinzaine de travaux expérimentaux de l'INERIS et d'autres organismes.

Elle a permis de dégager des tendances sur les facteurs d'influence des émissions et les écarts pouvant être observés sur les performances environnementales et énergétiques des appareils selon les conditions réalisation des tests.

- Les principaux facteurs ayant une influence sur les performances environnementales et énergétiques des appareils sont l'allure (réduction de l'allure en agissant sur les entrées d'air), l'essence et l'humidité du bois ainsi que le vieillissement des appareils (déformation, perte d'étanchéité).
- Les tests menés selon les normes en vigueur pour évaluer les performances énergétiques et environnementales des appareils sont effectués uniquement dans des conditions de référence bien particulières. Ces conditions nominales sont souvent relativement éloignées des conditions réelles de fonctionnement décrites ci-dessus. La réalisation de tests dans ces conditions de fonctionnement conduirait d'après les études AFAC, 2015 et Bereal 2017 :
 - à sous-estimer fortement les émissions réelles de polluants qui sont principalement émis lors de phases exclues de ces tests (CO et COV émis en grande quantité lors de l'allumage et lors du régime de braises, et de PM émises essentiellement lors de l'allumage). L'application d'un protocole plus réaliste (prise en compte de l'intégralité de la combustion, allumage à froid et régime de braises compris) conduirait par exemple à une augmentation de 260% à 370% des émissions de CO, de 410% des émissions de COV et de 300% à 500% des émissions de la fraction solide des particules par rapport à l'application du protocole normalisé.
 - à surestimer le rendement énergétique, de 5 à 16 points.

VOIES D'AMELIORATION

La caractérisation à l'émission des deux fractions, solide et condensable, est indispensable dans l'objectif d'établir des facteurs d'émission pertinents pour alimenter les inventaires d'émission du CITEPA.

Pour ce faire, les méthodes SPC ou DT, qui permettent une détermination de la fraction condensable, en plus de la fraction solide habituellement déterminée (méthode SP), doivent être préconisées.

S'agissant de la directive Ecoconception, l'établissement de valeurs limites contraignantes sur la fraction solide et les COVT devrait permettre d'améliorer les performances environnementales des appareils.

Il existe par ailleurs un enjeu fort d'harmonisation des méthodes. A terme, il serait souhaitable que la méthode de mesure proposée par le consortium EN_PME_TEST se substitue aux deux méthodes décrites dans la PrEN16510 afin de disposer d'une méthode et de valeurs limites communes à travers l'Europe.

L'amélioration et l'homogénéisation des pratiques de prélèvements est également essentielle pour garantir la génération de données d'émission fiables et comparables.

Pour ce faire, il apparaît nécessaire que les organismes réalisant les tests d'aptitude des foyers montrent leur capacité technique à réaliser ces essais à travers une accréditation

selon le référentiel EN ISO 17025 pas uniquement sur les performances énergétiques, mais également sur les mesures de polluants. L'équivalence des résultats produits par ces organismes pourrait par ailleurs être démontrée à travers la participation obligatoire à des exercices interlaboratoires organisés sur une matrice de gaz réelle par un organisme accrédité selon le référentiel EN ISO 17043.

La réalisation d'essais de performances et de détermination des facteurs d'émission plus représentatifs, avec notamment la prise en compte de l'ensemble de la période de combustion et des conditions tests proches des usages réels des appareils, est indispensable.

Ceci pour éviter de mettre sur le marché des appareils uniquement optimisés pour fonctionner dans des conditions opératoires particulières non représentatives et permettre des progrès suffisants des rendements et des niveaux d'émission des appareils utilisés en conditions réelles.

PERSPECTIVES

De nouvelles études portant sur la photo-réactivité des effluents de combustion du bois mais également d'autres sources (combustion fossile, émissions industrielles, etc.), seront nécessaires dans le futur afin d'évaluer le potentiel global de formation d'aérosols secondaires et de mieux cerner la contribution des différentes sources à la pollution de l'air.

Des actions d'amélioration des connaissances sur les autres sources biomasse (brûlages « sauvages », PME du bois...) seront également nécessaires pour mieux cerner la part des différentes contributions.

Une prise en compte du vieillissement des appareils en comparant par exemple les performances d'appareils neufs à celles d'appareils utilisés depuis plusieurs années, est nécessaire.

L'information de l'utilisateur notamment par la promotion de bonnes pratiques d'utilisation est indispensable. En effet, certaines pratiques mériteraient d'être supprimées de certaines notices telles que l'augmentation de la charge à faible allure si les performances de l'appareil ne sont pas connues à cette allure. D'autres pratiques telles que le mode d'allumage par le haut qui permettrait (ERFI, 2017) de réduire lors des allumages à froid de 30 à 50% des émissions polluantes sur un cycle complet de combustion, sont quant à elles à promouvoir auprès des utilisateurs. Cette information doit être réalisée avec la participation de tous les acteurs concernés par cette problématique en France, afin de rendre cohérent et homogène le discours à faire passer auprès de la population.

Un suivi de l'efficacité sur le long terme des actions engagées (renouvellement des appareils, information des utilisateurs, etc.) pour une évaluation de l'évolution de la contribution de la biomasse et d'autres sources de particules et de précurseurs de secondaires, aux concentrations mesurées dans l'air ambiant (dispositif CARA), mais aussi dans l'air intérieur sera enfin nécessaire.

14. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADEME, 2014. Modes de chauffage dans l'habitat individuel - Avis de l'ADEME. Décembre 2014.

Afac, 2016, projet Cortea, Détermination de facteurs d'émission de polluants des foyers domestiques alimentés au bois - Rapport final. ADEME. 51 pages.

Baudic, A., Gros, V., Sauvage, S., Locoge, N., Sanchez, O., Sarda-Estève, R., Kalogridis, C., Petit, J.-E., Bonnaire, N., Baisnée, D., Favez, O., Albinet, A., Sciare, J. and Bonsang, B.: Seasonal variability and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the Paris megacity (France), *Atmos. Chem. Phys.*, 16(18), 11961–11989, doi:10.5194/acp-16-11961-2016, 2016.

BeReal 2016, Deliverable D7.1, Documentation and evaluation of field data demonstration.

BioIS. 2014 En cours de validation par l'ADEME]. Analyse bibliographique de l'impact sur la qualité de l'air intérieur de différentes modes de chauffage.

Brandelet, 2016, Caractérisation physico-chimique des particules issues du chauffage domestique au bois, Thèse.

Carablack 2018 projet Cortea, Convention ADEME

Champrobois, 2014, projet Cortea, Convention ADEME n°1262C0012, Transformation physico-chimique d'un aérosol de combustion de bois en champ proche de la source, Rapport final provisoire INERIS-DRC-14-128277-11309A.

ERFI 2017, I. FRABOULET, 2016, Etude ERFI, Evaluation des performances des systèmes de réduction des émissions de polluants pour les appareils individuels de chauffage au bois – Rapport final. ADEME. 102 p., DRC-1 6 -155779-09860B

Eu low dust, Next generation small-scale biomass combustion technologies with ultra-low emissions, FP7 Program

Fine, P. M., Cass, G. R., and Simoneit, B. R. T.: Chemical characterization of fine particle emissions from the fireplace combustion of woods grown in the Southern United States, *Environ. Sci. Technol.*, 36, 1442–1451, 2002.

Identech, 2017, projet Cortea, Convention ADEME n°1301C0048, Identification des technologies existantes permettant de réduire les émissions polluantes des foyers domestiques avec prise en compte de différentes allures de fonctionnement, Rapport final INERIS-DRC-17-135957-01469A.

INERIS, 2002, Emissions liées à la combustion du bois par les foyers domestiques. Etude pour le Ministère en charge de l'Environnement, rapport INERIS-DRC-02-25420-AIRE-n°271-SCo.

INERIS, 2008. Évaluation de l'impact des appareils de chauffage à bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur. Rapport final 2008 (INERIS, LCME, CSTB et CITEPA) : DRC-08-70801-15219A. rapport disponible en ligne sur INERIS.fr.

Grieshop, A. P., J. M. Logue, N. M. Donahue, A. L. Robinson (2009) Laboratory investigation of photochemical oxidation of organic aerosol from wood fires 1: measurement and simulation of organic aerosol evolution, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 1263–1277.

Lipsky E. M., A. L. Robinson (2006) Effects of Dilution on Fine Particle Mass and Partitioning of Semivolatile Organics in Diesel Exhaust and Wood Smoke. *Environ. Sci. Technol.*, 40 (1), 155–162.

Linuma Y, Böge O, Gräfe R, Herrmann H. Methyl-nitrocatechols: atmospheric tracer compounds for biomass burning secondary organic aerosols. *Environ Sci Technol.* 2010 Nov 15;44(22):8453-9. doi: 10.1021/es102938a.

Nalin, F., Golly, B., Besombes, J.-L., Pelletier, C., Aujay-Plouzeau, R., Verlhac, S., Dermigny, A., Fievet, A., Karoski, N., Dubois, P., Collet, S., Favez, O. and Albinet, A.: Fast oxidation processes from emission to ambient air introduction of aerosol emitted by residential log wood stoves, *Atmospheric Environment*, 143, 15–26, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.08.002, 2016.

Nussbaumer, T., C. Czasch, N. Kippel, L. Johansson, C. Tullin, C.(2008) Particulate emissions from biomass combustion on IEA countries – Survey on measurements and emission factors, IEA Bioenergy Task 32, ISBN 3-908705-18-5, January 2008.

Nussbaumer T., A. Lauber (2010) Formation mechanisms and physical properties of particles from wood combustion for design and operation of electrostatic precipitators, 18th European Biomass Conference and Exhibition, Lyon, 3-7 May 2010.

OMNI, 2011, Measurement of Space-Heating Emissions.

Peren2Bois, 2012, Evaluation technico-économique des performances énergétiques et environnementales des meilleures techniques disponibles de réduction des émissions de poussières fines et de composés organiques pour les appareils de combustion domestique utilisant la biomasse, projet ADEME BIP coordonné par l'INERIS, Convention n° 0801C0019

Salam, A., Bauer, H., Kassin, K., Ullah, S.M., & Puxbaum, H. (2003). Aerosol chemical characteristics of a mega-city in Southeast Asia(Dhaka-Bangladesh). *Atmospheric Environment*, 37, 2517–2528.

SINTEF, 2012, Environmental and energetic performance history and further improvement potential for wood stoves, 20th European biomass conference and exhibition, Milan, 18-22 June 2012.

SINTEF, 2013, Measurement of Space-Heating Emissions.

Shrivastava, M. K., E. M. Lipsky, C. O. Stanier, A. L. Robinson (2006), Modeling Semivolatile Organic Aerosol Mass Emissions from Combustion Systems, *Environ. Sci. Technol.*, 40 (8), 2671-2677.

Srivastava, D., Favez, O., Bonnaire, N., Lucarelli, F., Perraudin, E., Gros, V., Villenave, E., Albinet, A. Speciation of organic fractions does matter for aerosol source apportionment. Part 2: Intensive campaign in the Paris area (France). *Science of the Total Environment*, in preparation, 2018.

15. ANNEXES

Annexe	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Les méthodes de mesurage et leur comparabilité L'influence des conditions de fonctionnement des appareils sur les émissions de polluants et les rendements L'évaluation des performances des techniques réduction des émissions	16

ANNEXE 1

Les méthodes de mesurage et leur comparabilité

**L'influence des conditions de fonctionnement des appareils sur les émissions de
polluants et les rendements**

L'évaluation des performances des techniques réduction des émissions

ANNEXES

1. LES METHODES DE MESURAGE ET LEUR COMPARABILITE

Deux documents (T. Nussbaumer et al, 2008 ; T. Nussbaumer, 2010) apportent des éléments de comparaison entre les méthodes normalisées de mesurage des émissions de particules :

- Méthode SP (filtration à chaud) : prélèvement dans le conduit de fumées par sonde chauffée et piégeage sur filtre chauffé uniquement. La masse de particules recueillie est déterminée par gravimétrie. Ce type d'approche correspond à la méthode simplifiée allemande DIN+ - température de filtration¹ : 70°C, décrite dans la TS 15883) et au projet de norme prEN16510-1 (température comprise entre 70°C et 160°C). Cette méthode a vocation à ne prélever que la fraction solide. Cependant, si la température de consigne est trop faible, une partie de la fraction condensable sera prélevée, ce qui peut augmenter la dispersion des résultats obtenus.
- Méthode SPC (filtration à chaud suivie d'un piégeage par barbotage de la fraction condensable) : après filtration à chaud (cf. méthode SP), l'échantillon passe à travers une série de barboteurs maintenus à moins de 20°C contenant de l'eau (method 5H de l'US EPA - température de filtration : 120°C) ou un solvant organique pour piéger les espèces organiques condensables (méthode EN TS 15439 : 2006 utilisée pour la gazéification de la biomasse). Après évaporation de l'eau ou du solvant organique, la masse de particules collectée est additionnée à celle mesurée sur le filtre. Cette méthode présente l'avantage de distinguer les fractions solide et condensable.
- Méthode DT (filtration après passage des fumées dans un tunnel de dilution) : la totalité des fumées sortant du foyer est collectée et diluée avec un faible ratio de dilution (de l'ordre de 15) avec de l'air ambiant via une hotte d'aspiration (tunnel de dilution), un échantillonnage sur filtre est ensuite effectué (méthodes anglaise British standard BS 3841-1, filtration à 70°C, norvégienne NS 3058-2, filtration à 35°C, et américaine method 5G, filtration à moins de 32°C). Du fait de la dilution, la température décroît et les espèces condensables se transforment en aérosols. Un échantillon est prélevé sur filtre en sortie du tunnel de dilution. Les fractions solide et condensable des particules sont donc prélevées de manière combinée sans qu'il soit possible de les différencier.

¹ Il s'agit ici de la température de consigne et non de la température mesurée dans le flux. Dans le cas de la méthode DIN+, ces deux températures peuvent différer sensiblement du fait de la faible valeur de la température de consigne (70°C).

Toutes ces méthodes applicables à l'émission d'un foyer domestique conduisent à des résultats fort différents. La méthode SP, simple à mettre en œuvre, présente le défaut de ne pas prendre en compte la fraction organique condensable émise, donc la quantité de particules émises et la quantité de particules dans l'air ambiant résultant de la combustion. Utilisée seule, elle n'est pas suffisamment discriminante pour identifier les appareils les plus performants. L'idée de la combiner à l'analyse des COVT tel que préconisé dans les conclusions du projet EN_PME_TEST est donc une avancée majeure par rapport aux pratiques antérieures. L'amélioration des conditions de combustion conduit en effet à une réduction significative des émissions de composés organiques condensables et dans une moindre mesure du paramètre COVT, non quantifiés au moyen de la méthode SP. Par ailleurs, en fonction des matériels de prélèvement utilisés, la température réelle de filtration peut fortement fluctuer et conduire à une plus grande variabilité des résultats obtenus (la température de filtration ne pouvant être maintenue constante durant l'ensemble de l'essai si la température de consigne retenue est trop faible).

La méthode SPC présente l'avantage de quantifier séparément les particules solides et la fraction organique condensable à moins de 20°C telle qu'elle est émise par le foyer domestique. Certains composés condensables présents sous forme gazeuse dans le conduit où règnent des températures élevées sont comptabilisés au moyen de cette méthode du fait de la condensation à moins de 20°C. Bien que plus complexe que la méthode précédente, cette méthode peut encore être mise en œuvre avec une relative facilité. Elle permet par ailleurs d'obtenir le ratio fraction condensable / particules solides, ce qui semble être particulièrement intéressant pour appréhender la qualité de combustion d'un appareil.

La méthode 5H de l'US EPA est une variante de la méthode SPC qui prévoit la quantification des composés organiques condensables par barbotage dans de l'eau. Or, certaines espèces inorganiques gazeuses tels que les SO₂, SO₃, peuvent interférer (former des composés solides dans l'eau dans certains cas). Ce biais peut parfois être à l'origine d'une surestimation des émissions et pourrait expliquer l'écart observé entre les méthodes 5H et 5G, méthode DT normalisée par l'US EPA (correspondant à un facteur 1,33). Il pourrait être levé en prélevant la fraction organique condensable dans un solvant organique qui n'interfère pas avec des espèces gazeuses inorganiques. De plus la méthode US EPA 5H présente l'inconvénient de nécessiter la réalisation d'une extraction liquide-liquide au dichlorométhane, étape très consommatrice de temps et générant des expositions des travailleurs à un solvant classé CMR. Une seconde méthode dite « méthode à barboteur IPA » basée sur le même principe mais faisant intervenir l'isopropanol à la place de l'eau en tant que solvant de barbotage a été testée par l'INERIS. Cette méthode basée sur la méthode EN TS15439 dédiée à la caractérisation des émissions des procédés de gazéification de la biomasse permet de supprimer l'étape d'extraction liquide/liquide, l'échantillon étant traité par simple évaporation ; évitant ainsi l'utilisation d'un solvant toxique le dichlorométhane. Des tests de comparaison avec la méthode US EPA 5H ont été réalisés et ont indiqué une très bonne cohérence entre les résultats des deux méthodes (n=8 ; pente = 0,93 ; R² = 0,97).

La méthode DT prend en compte les fractions particulaire et condensable, sans qu'il soit possible de les distinguer. La fraction inorganique condensable étant négligeable, les résultats obtenus au moyen de cette méthode devraient être similaires à ceux obtenus au moyen de la méthode SPC. Dans les faits, cela ne s'avère pas totalement exact car la dilution provoque un abaissement de la tension de vapeur des espèces organiques : certains composés organiques présents sous forme solide ou liquide dans l'effluent gazeux sont complètement ou partiellement volatilisés après dilution à température ambiante. Compte tenu des faibles taux de dilution inhérents à cette méthode (de l'ordre de 10-15) et des températures encore élevées régnant dans le tunnel de dilution (30 à 50°C environ), le comportement des aérosols n'est pas non plus identique au comportement réel des aérosols émis dans le milieu ambiant par un foyer domestique (où le taux de dilution considéré est supérieur à 10 000 et la température est plus basse). De plus, le taux de dilution de cette méthode

ne peut être contrôlé ; il évolue en cours d'essai en fonction de la quantité et de la température des fumées émises. Ce taux de dilution est par ailleurs susceptible d'évoluer d'un essai à l'autre.

Corrélation entre les méthodes SPC et DT :

Aux Etats Unis – Canada, les appareils sont certifiés au moyen des méthodes SPC (method 5H : filtration à 120°C suivie d'un barbotage dans de l'eau) et DT (method 5G : tunnel de dilution). L'US EPA considère que la méthode SPC donne des résultats moins représentatifs des émissions des foyers domestiques et préconise d'utiliser la méthode DT pour la détermination de facteurs d'émission. Une corrélation a été établie avec un nombre important d'appareils (plus de 100) afin de comparer les résultats obtenus au moyen de ces deux méthodes. La méthode 5G permet d'obtenir des résultats dits « équivalents » à la méthode 5H. Cette corrélation est toutefois médiocre ($R^2 = 0,52$). Elle a été établie sous différentes conditions de fonctionnement des appareils (en particulier à des allures distinctes).

La méthode dite de barbotage à l'IPA a été comparée à plusieurs reprises (travaux du CEN, projets ADEME EN_PME_TEST, AFAC) par l'INERIS à la méthode DT (35 tests) ainsi qu'à l'analyse des COVT par FID (43 tests)

Les résultats de comparaison des résultats des méthodes SPC et DT obtenus mettent en évidence une forte corrélation ($R^2 = 0,92$) avec une pente de la droite proche de 1.

Le biais lié à la méthode 5H disparaît en prélevant la fraction organique condensable dans un solvant organique qui n'interfère pas avec des espèces gazeuses inorganiques.

Une assez bonne corrélation est également obtenue (coefficient de détermination 0,88) avec une pente de 0,36 entre la fraction condensable déterminée avec la méthode à barboteurs à l'isopropanol et les COVT déterminés par analyse FID. Aucune corrélation n'est toutefois observée pour les appareils très performants (Identech, 2017)

Tableau 1 : Directive Ecoconception, exigences spécifiques applicables aux émissions de COVT et particules

Paramètre	COVT (mgC/m ³) à 13% d'O ₂	Poussières (TSP)		
		Mesurées selon méthode filtre chauffé (SP)(mg/m ³) à 13% d'O ₂	Mesurées selon tunnel à dilution ou électrofiltre méthode BS 3841-1 (DT1) (g/kg de matière sèche brûlée)	Mesurées selon tunnel à dilution méthode NS 3058-2 (DT 2) (g/kg de matière sèche brûlée)
Foyer ouvert	120	50	-	6
Foyer fermé à bûches	120	40	2,4	5
Foyer fermé à granulés	60	20	1,2	2,5

La méthode NS 3058-1 préconise l'utilisation d'un tunnel à dilution et la réalisation des prélèvements sur le cycle entier de combustion, en tirage naturel. La norme BS 3841-1 préconise l'utilisation d'un tunnel à dilution ou d'un électrofiltre et la réalisation des prélèvements pendant 30 minutes avec un tirage forcé à 12 Pa.

2. INFLUENCE DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT DES APPAREILS SUR LES EMISSIONS DE POLLUANTS ET LES RENDEMENTS

Les principaux paramètres ayant une influence sur les performances environnementales et énergétiques des appareils a fait l'objet d'une étude bibliographique récente (rapport INERIS DRC-17-164787-08043A). Les principaux résultats sont présentés ci-après.

Humidité du bois

Les émissions de polluants peuvent augmenter fortement mais pas de façon linéaire avec l'humidité du bois. Les émissions de PM peuvent par exemple augmenter de plus de 100%. Une teneur en humidité du bois aux environs de 25% paraît toutefois nécessaire pour provoquer cette forte augmentation. En revanche, en deçà de cette valeur, l'humidité a peu d'influence sur les émissions de polluants. L'humidité du bois n'a quasiment pas d'influence sur les émissions de NO_x. Son impact sur le rendement est méconnu.

Il convient donc de préconiser une humidité inférieure à 20%, correspondant à un temps de séchage en extérieur sous abri en général compris entre 18 et 24 mois selon les essences et les conditions extérieures.

Essence de bois

En France, bon nombre d'essences sont susceptibles d'être brûlées ; les espèces brûlées étant généralement celles poussant dans la région de l'utilisateur de l'appareil de combustion. Il n'existe actuellement pas de données précises concernant la consommation des différentes essences pour le chauffage en France.

Dans la plupart des études menées pour établir des facteurs d'émission de polluants, un certain nombre d'essences est régulièrement utilisé : le chêne, le hêtre et le sapin notamment. Ces espèces sont plutôt spécifiques à l'Europe.

A l'exception des NO_x, les émissions de polluants, notamment de PM sont bien plus élevées pour les résineux et pour le chêne que pour le hêtre. En revanche l'essence n'a que peu d'influence sur le rendement.

La conception de l'appareil a toutefois une influence importante sur les émissions de telle ou telle essence de bois. Ces dernières ne nécessitant pas les mêmes quantités et répartition d'air dans le foyer pour brûler dans de bonnes conditions, le dimensionnement des entrées d'air dans un foyer sera réalisé en supposant l'utilisation d'un bois majoritaire par les acheteurs potentiels. Les performances d'une essence sont donc intimement liées à l'apport d'air dans la chambre de combustion (répartition des entrées d'air et quantité d'air disponible).

Un autre paramètre intervient alors sur les émissions de polluants : l'étanchéité des appareils. Pour les appareils les plus récents particulièrement étanches dont les entrées d'air sont optimisées pour brûler du hêtre ou du charme, l'introduction dans la chambre d'une essence plus dure, tel que le chêne qui nécessite davantage d'air pour bien brûler, peut occasionner de plus fortes émissions du fait du manque d'air.

Sur les poêles anciens, appareils non étanches avec des excès d'air a priori élevés, la combustion du chêne et du sapin conduirait à une augmentation importante des émissions par rapport à la combustion du hêtre.

Pour les foyers ouverts, les émissions augmentent fortement lors de l'utilisation du chêne et de résineux (par rapport au hêtre).

Allure

L'allure de fonctionnement correspond, d'un point de vue de l'utilisateur, à la puissance de chauffage désirée/fournie. Ainsi pour les foyers fermés, les notices d'emploi mentionnent que l'allure réduite peut être atteinte en obturant les entrées d'air. Le comburant étant présent en plus faible quantité, la combustion sera ralentie et la puissance fournie, moindre. Pour les foyers ouverts, ne pouvant jouer sur le débit d'air, l'unique solution pour réduire l'allure est de diminuer la charge de bois introduite. Même si l'objectif est le même, le phénomène est physiquement différent du précédent : dans le premier cas l'excès d'air diminue tandis qu'il a tendance à augmenter dans le second. Réduire l'allure sur un foyer ouvert ou fermé n'aura donc pas la même incidence sur la combustion et la production de polluants. Notons également qu'il est possible d'introduire une charge moindre dans un foyer fermé pour réduire sa puissance de chauffe.

Réduire l'allure conduit à augmenter fortement les émissions de polluants. Les PM semblent être le polluant le plus influencé par l'allure, avec des augmentations souvent supérieures à 100%, avec en complément une forte fraction condensable mais une faible fraction de BC (Champrobois, 2014). Une réduction de l'allure permet d'augmenter très légèrement le rendement (moindres pertes thermiques et temps de séjour probablement plus élevé).

Réduire la puissance de chauffe en diminuant la charge de combustible pourrait s'avérer une solution moins néfaste pour l'environnement mais nécessite la présence d'un opérateur et l'alternance de charges nominale et réduite afin de disposer d'un lit de braises suffisant.

Charge

La puissance thermique dégagée par un appareil peut être contrôlée de deux manières distinctes, soit en obturant plus ou moins les arrivées d'air, soit en augmentant ou réduisant la charge. Une charge nominale, pour laquelle l'appareil a été conçu pour fonctionner dans des conditions optimales, est préconisée par le fabricant. Lorsque la charge introduite s'éloigne de cette valeur cible, la qualité de la combustion peut se dégrader et les émissions polluantes augmenter (Champrobois, 2014). Une quantité trop importante de combustible peut par exemple obturer les entrées d'air secondaires, conduire à un trop faible excès d'air, réduire la « densité calorifique » à l'intérieur de la chambre et ainsi contribuer à la refroidir.

Les constructeurs préconisent fréquemment dans les notices d'utilisation des appareils d'augmenter la charge à allure réduite afin d'accroître la durée de la combustion (fonctionnement « nuit »).

L'influence de la charge sur les émissions polluantes semble relativement modérée. Elle influence également relativement peu le rendement. Cependant les appareils sont conçus pour fonctionner à une charge nominale et quand la quantité de bois introduite s'écarte de ce standard, les émissions polluantes ont tendance à augmenter.

En fait, l'influence de la charge est étroitement liée à l'allure de fonctionnement du foyer fermé. Augmenter la charge à allure réduite (en manque d'air) contribue à dégrader la qualité de la combustion. Dans le cas d'une allure nominale (avec un apport d'air suffisant), une augmentation de la charge par rapport à la charge nominale n'a quasiment pas d'influence sur la qualité de combustion et les émissions polluantes. Dans la même configuration, diminuer la charge par rapport aux préconisations du constructeur aura tendance à dégrader la combustion, probablement à cause d'un excès d'air trop important refroidissant la chambre de combustion.

Enfin, il semblerait que quand le combustible est sous forme de pellets, réduire la charge s'avère plus polluant que pour les appareils à bûches. Ceci pourrait être dû au fait que les appareils à pellets, modernes, sont optimisés pour brûler une quantité précise de combustible et que les réglages de ces appareils n'évoluent pas ou insuffisamment à allure réduite. Enfin, l'analyse des résultats obtenus avec un foyer ouvert met en évidence un faible impact de la charge.

Pour les appareils à bûches, l'impact de la charge de bois restant particulièrement modéré par rapport à d'autres paramètres tel que l'allure, il convient donc de réduire la charge de combustible introduite plutôt que d'obturer les entrées d'air pour réduire la puissance de chauffe d'un appareil.

Notons par ailleurs que les commentaires mentionnés ci-dessus ne sont valides que si des conditions d'utilisation acceptables des appareils sont respectées. L'impact d'une augmentation de charge pourrait s'avérer particulièrement notable dans un certain nombre de cas, par exemple lorsque celle-ci conduit à obturer les entrées d'air secondaires de l'appareil (qui jouent alors le rôle d'arrivées d'air primaire) ou que la charge n'est constituée que d'une seule bûche de forte dimension. La dimension et le diamètre des bûches interviennent sur le passage de l'air dans la zone de combustion et donc sur l'homogénéité des températures dans la chambre.

Tirage (naturel) / hauteur du conduit

Il s'agit d'un paramètre sur lequel l'utilisateur peut difficilement agir. Il est notamment lié à la hauteur de cheminée et aux conditions météorologiques (différence de températures entre air extérieur et intérieur).

Les appareils sont conçus pour fonctionner à des tirages inférieurs à 20 Pa. Des essais menés à allure nominale à 12 et 18 Pa ne mettent pas évidence d'influence notable de ce paramètre sur les émissions de polluants ou le rendement. Dans bon nombre de logements, il dépassera aisément les 20 Pa, ce qui correspond environ à un conduit de 4 m de hauteur. Un tirage excessif (au-delà de 20 Pa), se traduit par un excès d'air trop important, ce qui occasionne une combustion vive et une consommation excessive de bois ainsi qu'une perte de rendement (température des fumées très élevées). Pour faire face à une surchauffe de son logement, l'utilisateur a alors la possibilité :

- soit de réduire la quantité de bois introduite dans la chambre, ce qui peut être à l'origine d'une combustion plus froide (excès d'air élevé) qui va se traduire par une dégradation de la combustion,
- soit de fermer les entrées air, le feu est alors alimenté avec de l'air parasite ce qui conduit à une forte détérioration de la combustion.

Pour pallier cet inconvénient, il est possible de mettre en place sur le conduit un régulateur de tirage mais relativement peu de logements en sont équipés.

A contrario, une grande longueur de conduit est susceptible de favoriser le rendement (gain d'un à deux points) par une augmentation de la surface d'échange et de limiter les émissions de particules par dépôt le long des parois du conduit des espèces condensables. Selon les caractéristiques du conduit, ce dépôt pourrait représenter de 10% (conduit droit de hauteur 4 m - projet CORTEA AFAC) à 40% (conduit comprenant deux coudes à 90° - thèse de Benoit Brandelet, 2016) des particules totales.

Vieillessement des appareils

Du fait des contraintes thermiques et des produits corrosifs générés lors de la combustion auxquels l'appareil est exposé lors de son utilisation au fil du temps, des entrées d'air non maîtrisées peuvent apparaître. Ces entrées d'air froid à des endroits non souhaités dans la chambre de combustion conduisent :

- à dégrader la qualité de la combustion (diminution de la température de la chambre de combustion),
- à favoriser la formation de carbone suie,
- mais aussi inversement, à favoriser l'oxydation de certains polluants tels que le CO et les COVT et donc à limiter les émissions de ces polluants.

Ce vieillissement peut avoir un impact sur la qualité de la combustion et par conséquent, sur les émissions polluantes. Les émissions de PM augmenteraient d'environ 100% sur un appareil ancien par rapport à un appareil neuf (Sintef, 2013).

Des études complémentaires mériteraient donc d'être réalisées pour mieux cerner l'impact de ce paramètre.

Interaction entre paramètres

Par ailleurs, l'influence de ces paramètres sur les émissions de polluants peut être plus ou moins élevée en fonction des autres conditions d'utilisation d'un appareil. Il a par exemple été mis en évidence lors de plusieurs études (Champrobois, 2014, Qualicomb, 2016, Afac, 2016) que la combinaison de deux facteurs intervenant négativement sur la qualité de la combustion donne lieu à des émissions de polluants supplémentaires à celles dues à ces deux paramètres pris séparément.

Illustration de l'influence de certains paramètres

Pour illustrer l'influence de certains de ces paramètres sur les émissions, citons Albinet et al., 2015b qui ont utilisé une instrumentation en ligne pour étudier la dynamique des émissions de particules et de traceurs de combustion de biomasses, tels que le Black Carbon (BC) et le lévoglucosan, en situation réelle simulée.

Les résultats obtenus mettent en évidence le lien entre l'évolution des teneurs en polluants et les conditions d'essais (allure de l'appareil, charge de bois) ou les différentes phases de la combustion. Par exemple, le BC constitue la majeure partie de la fraction solide des $PM_{2.5}$ durant le cycle entier de combustion à allure nominale, tandis que les émissions d'espèces organiques sont majoritaires à allure réduite (Figure 1). Par ailleurs, le lévoglucosan, largement utilisé comme traceur de combustion est essentiellement émis durant des périodes où la qualité de la combustion est médiocre (allumage à froid, pré-charge, allure réduite, forte charge qui provoque un refroidissement de la chambre de combustion). Rappelons que le lévoglucosan est un composé très hydrophile appartenant à la famille des composés organiques semi-volatils.

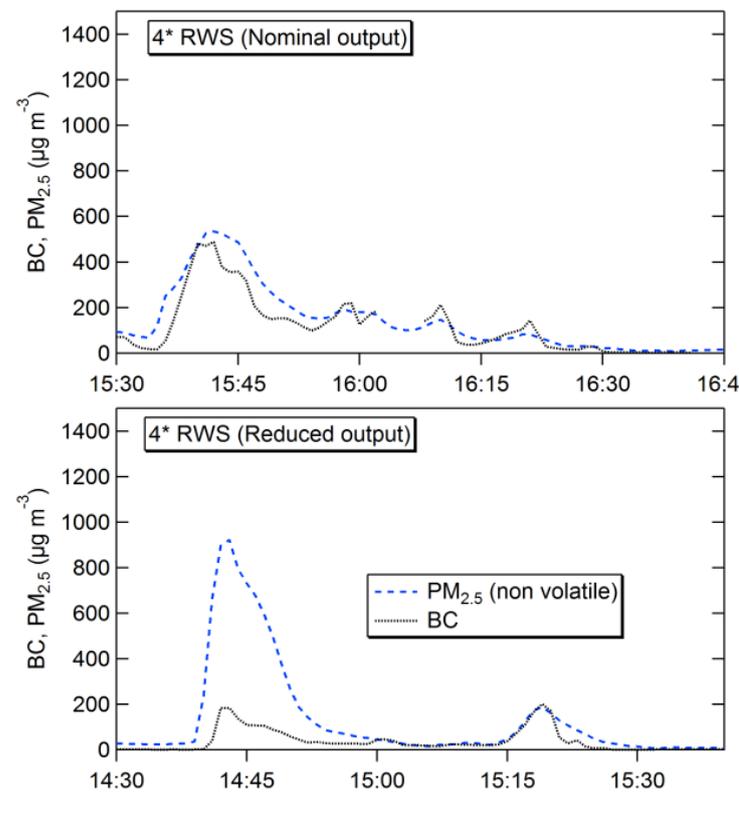


Figure 1 : Evolution des teneurs en BC et $PM_{2.5}$ (non volatile) lors de tests d'un appareil Flamme verte 4* à allure nominale et réduite (Champrobois, Albinet et al., 2015)

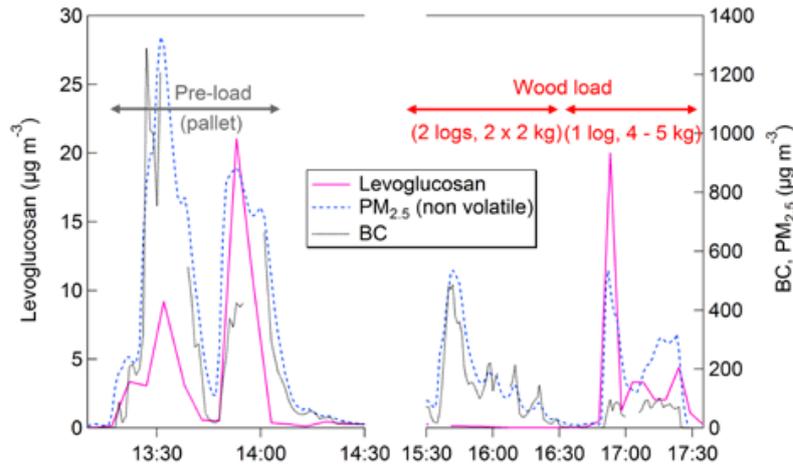


Figure 2 : Evolution des teneurs en lévoglucosan, BC et en $\text{PM}_{2.5}$ (non volatile) lors de tests d'un appareil Flamme verte 4* durant différentes périodes de combustion à allure nominale (hêtre à 12% d'humidité) (Champrobois, Albinet et al., 2015).

3. EVALUATION DES PERFORMANCES DES TECHNIQUES REDUCTION DES EMISSIONS

ETUDES REALISEES EN EUROPE

Neuf études visant à caractériser les performances d'abattements des techniques de réduction ont été réalisées en Europe depuis 2008. Les spécificités de ces études et les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux suivants.

Tableau 2: Techniques de réduction testées

Erreur ! Source du renvoi introuvable. Les résultats obtenus pour les différentes techniques sont présentés dans le Tableau 3 .

Un bilan des données disponibles sur les techniques commercialisées en Europe est fourni dans les tableaux 4 à 8.

Tableau 3 : Efficacité des techniques de réduction

Technique	Efficacité annoncée	Données efficacité disponibles dans la littérature	Données efficacité INERIS	
Insert-ouvert Finoptim	Foyer ouvert Rendement 45% Concentration 70 mg/Nm ³ à 13% d'O ₂	-	Rendement 30% (inchangé par rapport à foyer ouvert neuf) TSP solide 66%, TSP condensable 42% COVT 54%, CO 49%	
Ecoxy retrofit	PM 75 % Augmentation du rendement de 20 %	PM 60 – 80 % Laboratoire 20-73% Site réel 37-47%	-	
Aduro Smart	Aucun résultat disponible			
Blue Chimney	Aucun résultat disponible			
Filtre électrostatique R_ESP APP (CleanAir ESP APP)	TSP 85 – 99 %	Labo 55-95% Terrain 40-80%	TSP solide > 80%	
Filtre électrostatique AirJekt (Zumikron)	TSP solide 57 - 81%	Labo 11-79% Terrain 40-60%	TSP solide 56%	
Filtre électrostatique TopClean Poujoulat (Oekotube-Okeosolve)	TSP solide 50-90% (foyers fermés), TSP solide 40% (foyers ouverts)	Données études Suisses Foyers fermés 50-90% en masse, foyers ouverts 40% en masse	Foyer ouvert TSP solide 56% TSP condensable 7%	Foyer fermé TSP solide+ condensable 35%
Filtre électrostatique AirBox Spartherm			-	
Filtre catalytique ABCAT	PM 95% PAH 65% COVT 90%		-	
Filtre catalytique Zero CO (Fondis-Poujoulat)	TSP solide 50 %		T fumées > 150°C TSP solide aucune efficacité TSP condensable 69%, CO 67% COVT 49%	T fumées < 150°C TSP solide aucune efficacité TSP condensable aucune efficacité, CO 68% COVT aucune efficacité
Ofenkatalysator	TSP solide > 50 %	CO 38%-93% TSP solide 12% COVT aucune efficacité-60% COVNM 80-100% HAP 20-74 %	TSP solide aucune efficacité TSP condensable aucune efficacité CO 30% HAP 80%	

Tableau 4 : Techniques primaires commercialisées en Europe

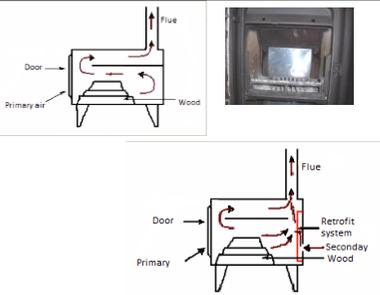
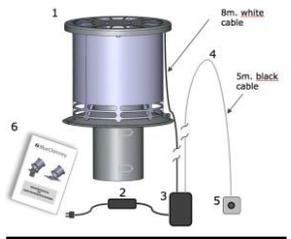
Nom du dispositif		Insert ouvert Finoptim	Ecoxy Retrofit	Aduro Smart Response	Blue Chimney
Type de dispositif		 <p>Echangeur air / braises</p>			 <p>Extracteur de fumées</p>
Descriptif et spécificités de conception		<p>Amélioration de la combustion (rendement) par réchauffage de l'air de combustion dans le foyer, création d'air secondaire dans foyer ouvert : Aucune alimentation électrique nécessaire</p>	<p>Le système Retrofit d'Ecoxy consiste en une plaque à installer au niveau du fond de la chambre de combustion du poêle et qui, de par sa position, permet un apport d'air tertiaire ce qui améliore le rendement.</p>	<p>Dispositif doté d'une application et de deux capteurs, communiquant grâce à une technologie sans fil (Bluetooth) avec un smartphone ou une tablette Cette application permet d'utiliser un poêle à bois de manière optimale. Des capteurs magnétiques sont installés à l'arrière du poêle et surveillent la combustion du bois. L'application conseille l'utilisateur pour que son poêle fonctionne au mieux (diminuer la température, remettre du bois, etc), afin d'avoir un rendement optimum.</p>	<p>Régulation du tirage indépendamment des conditions météorologiques, amélioration de la combustion notamment lors des allumages Dilution des fumées à l'émission (ratio 25), diminution des odeurs de fumées</p>
Conditions et limites d'utilisation		<p>Développé pour foyers ouverts, également compatibles avec foyers à pertes amovibles Testés avec poêles, mais nécessité d'adapter la taille</p>	<p>Développé pour foyers fermés anciens</p>	<p>Développé pour foyers fermés Limité aux usagers habitués aux technologies numériques</p>	<p>Compatible avec poêles et foyers fermés jusqu'à 15 kW</p>
Coûts	Achat, installation comprise (€ TTC)	Entre 1 980 € et 3 960 € suivant la taille	435 €	99 €	699€
	Utilisation (€ HT)	Pas de surcoût	Pas de surcoût		
	Entretien (€ HT)	Pas de surcoût	Pas de surcoût		

Tableau 5 : Filtrés électrostatiques commercialisés en Europe

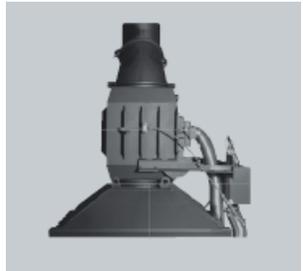
Nom du dispositif		TopClean (Oekotube)	Airjekt (Zumikron)	S-Airbox (Spartherm)
Type de dispositif		 <p>Electrode tubulaire (de 1 cm de diamètre et 1,6 m de long) placée au centre du conduit, au niveau de sa sortie Puissance électrique < 30W</p>	 <p>Fin filament placé au centre du conduit Tension +20 kV Puissance électrique ≤ 9 W</p>	 <p>Système placé en sortie d'appareil</p>
Descriptif et spécificités de conception		<ul style="list-style-type: none"> Filtration électrostatique, séparation mécanique gaz/particules, agit préférentiellement sur la phase solide, positionnement en bout de conduit permet une température des fumées plus faible, d'éliminer une partie des espèces condensables Existe en deux versions : dans le conduit et end of pipe Alimentation électrique nécessaire 	<p>Inséré dans le conduit en respectant les distances minimales reportées dans la notice (cf. conditions de mise en œuvre)</p> <ul style="list-style-type: none"> Adaptable à tout type d'appareil respectant les limites spécifiées dans la notice (cf. limites d'utilisation) 	<p>≤ 15 W</p> <p>Ce système est :</p> <ul style="list-style-type: none"> formé d'un caisson spécifique positionné en aval de la buse de l'appareil muni d'un registre manuel conditionnant la déviation des fumées vers le réseau d'électrodes (ou son évacuation directe en conduit)
Conditions et limites d'utilisation		<ul style="list-style-type: none"> Diamètre du conduit : 130 - 300 mm Puissance maximale de l'appareil de chauffage : 70 kW Gamme de température des fumées entre 55°C et 400°C 	<ul style="list-style-type: none"> Diamètre du conduit : 150 - 300 mm Puissance maximale de l'appareil de chauffage : 35 kW Température maximale des fumées : 400 °C 	
Coûts	Achat, installation comprise (€ TTC)	<ul style="list-style-type: none"> sans changement de conduit (si conduit initial est métallique) 2 370 € avec installation d'un tubage dans conduit maçonné 2 870 € avec changement de conduit 4 370 € 	Prix d'achat : 1 200 € (Zumikron, pas d'info sur Airjekt)	
	Utilisation (€ HT)	Non communiqué	Non communiqué	
	Entretien (€ HT)	100€/an (ramonage)	Non communiqué	

Tableau 6 : Filtres catalytiques commercialisés en Europe

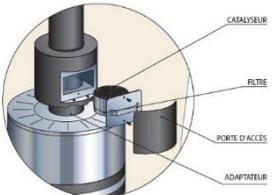
Nom du dispositif		ZeroCo	Ofenkatalysor Morecat/ABCAT
Type de dispositif		 <p>Monolithe métallique rectangulaire en forme de nid d'abeille</p>	 <p>Cylindre rempli de copeaux d'acier recouverts d'une substance active</p>
Descriptif et spécificités de conception		<p>Action chimique sur les gaz, principalement le CO, Gestion des basses températures par chauffage via résistances chauffantes dont l'allumage commandé par un capteur de température (modèle insert), alimentation électrique possible (modèle insert)</p>	<p>Action chimique sur les gaz, principalement le CO, les COV et les HAP, Gestion des basses températures via une rotation à 90° du catalyseur dans le conduit, effectuée manuellement (pas d'activité du catalyseur en phase démarrage à froid)</p>
Conditions et limites d'utilisation		<p>Température minimale fumées : 150 °C Compatibles avec foyers fermés et poêles uniquement, non compatible avec foyer ouvert</p>	<p>Température minimale fumées : Der Ofenkatalysator : 350 °C (pas d'activité du catalyseur en phase démarrage à froid) ABCAT : > 100°C, fonctionnement optimal à 350°C Compatibles avec foyers fermés et poêles uniquement, non compatible avec foyer ouvert</p>
Coûts	Achat, installation comprise TTC) (€)	<p>1 105 € pour version compatible avec poêle (changement de conduit inclus) 1 215 € pour version compatible avec insert (changement de conduit inclus)</p>	329 €
	Utilisation (€ HT)	Non communiqué	Pas de surcoût
	Entretien (€ HT)	Pas de surcoût	200€/5 ans

Tableau 7 : Bilan du positionnement des techniques primaires et secondaires de réduction vis-à-vis de la réglementation actuelle

Dispositif	Contraintes réglementaires supplémentaires	Evolutions réglementaires	Formation et habilitation des installateurs et ramoneurs,
TopClean (Oekotube)	<p>Obturation du conduit Perte de charges Risque refoulement de CO Sécurité électrique Vérification étanchéité du conduit après installation</p>	<p>Aucune à court terme : Avis technique N°14/14-1969</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Formation spécifique des installateurs (dont risque électrique) • Formation risque électrique des ramoneurs • Formation ramonage par le haut des ramoneurs
ZeroCo	<ul style="list-style-type: none"> • Obturation du conduit • Perte de charges • Risque refoulement de CO • Sécurité électrique pour option avec chauffage • Vérification étanchéité du conduit après installation 	<p>hors procédure d'évaluation ATEC ou ATEX², impossible de statuer sur une "conformité" du produit à la réglementation</p>	<p>Information des ramoneurs vis-à-vis de la présence du dispositif dans le conduit, à prendre en compte dans le mode de ramonage</p>
Insert ouvert Finoptim	Aucune	Aucune	Aucune
Ofenkatalysor Morecat/ABCAT	<p>Obturation du conduit Perte de charges Risque refoulement de CO Vérification étanchéité du conduit après installation</p>	<p>hors procédure d'évaluation ATEC ou ATEX, impossible de statuer sur une "conformité" du produit à la réglementation</p>	<p>Information des ramoneurs vis-à-vis de la présence du dispositif dans le conduit, à prendre en compte dans le mode de ramonage</p>
Airjekt (Zumikron)	<p>Obturation du conduit Perte de charges Risque refoulement de CO Sécurité électrique Vérification étanchéité du conduit après installation</p>	<p>hors procédure d'évaluation ATEC ou ATEX, impossible de statuer sur une "conformité" du produit à la réglementation</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Formation spécifique des installateurs (dont risque électrique) • Formation risque électrique des ramoneurs • Information des ramoneurs vis-à-vis de la présence du dispositif dans le conduit, à prendre en compte dans le mode de ramonage
S-Airbox	<p>Obturation du conduit Perte de charges Risque refoulement de CO Sécurité électrique Vérification étanchéité du conduit après installation</p>	<p>hors procédure d'évaluation ATEC ou ATEX, impossible de statuer sur une "conformité" du produit à la réglementation</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Formation spécifique des installateurs (dont risque électrique) • Formation risque électrique des ramoneurs • Information des ramoneurs vis-à-vis de la présence du dispositif dans le conduit, à prendre en compte dans le mode de ramonage
Smart Response Aduro	Aucune	Aucune	Aucune
Blue Chimney	<ul style="list-style-type: none"> • Obturation du conduit • Perte de charges • Risque refoulement de CO • Sécurité électrique 	<p>hors procédure d'évaluation ATEC ou ATEX, impossible de statuer sur une "conformité" du produit à la réglementation</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Information des ramoneurs vis-à-vis de la présence du dispositif dans le conduit, à prendre en compte dans le mode de ramonage

² ATEC : avis technique, ATEX : appréciation technique d'expérimentation

Tableau 8 : Bilan des informations disponibles sur les effets induits et retour d'expérience des utilisateurs pour les dispositifs commercialisés en Europe

Dispositif	Mode de collecte des informations	Efficacité sur le long terme	Entretien	Consommation électrique	Refoulement dans l'habitat	Détérioration de l'habitat	Nuisances sonores	Impact confort thermique, consommation de bois et rendement	Corrosion des conduits
TopClean (Oekotube)	Tests au laboratoire et sur site réel	Aucune dégradation de l'efficacité après une saison de chauffe	Entretien accru effectué lors du ramonage Entraînements de cendres volantes dues à l'agglomération de particules sur l'électrode vers l'atmosphère ou dans le foyer, évite d'avoir à ramoner trop fréquemment déformation de l'électrode à haute température (>300°C)		aucun	aucune	aucune	aucun	aucune
ZeroCo	Tests au laboratoire	-	-	Pour la version avec chauffage	aucun	-	aucune	aucun	aucune
Insert ouvert Finoptim	Enquête et test au laboratoire	-	Cendrier à vider, pas d'impact sur la fréquence de ramonage	aucune	aucun	aucune	aucune	Tests : aucun impact Enquête diminution consommation de bois (53% des utilisateurs) et amélioration rendement (61% des utilisateurs)	aucune

Ofenkatalysor Morecat/ABCAT	Tests au laboratoire et sur site réel				risque de refoulement dans l'habitat		aucune		
Dispositif	Mode de collecte des informations	Efficacité sur le long terme	Entretien	Consommation électrique	Refoulement dans l'habitat	Détérioration de l'habitat	Nuisances sonores	Impact confort thermique, consommation de bois et rendement	Corrosion des conduits
Smart Response Aduro	Aucune information disponible								
Blue Chimney	Aucune information disponible								
Ecoxy retrofit	Tests au laboratoire et sur site réel								
Airjekt (Zumikron)	Tests au laboratoire et sur site réel		Encrassement rapide du dispositif, entretien accru à réaliser				Bruit du ventilateur jugé inadapté		
S-Airbox	Tests au laboratoire et sur site réel								