



PEREN²BOIS : EVALUATION TECHNICO- ECONOMIQUE DES PERFORMANCES ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTALES DES MEILLEURES TECHNIQUES DISPONIBLES DE REDUCTION DES EMISSIONS DE POUSSIÈRES FINES ET DE COMPOSES ORGANIQUES POUR LES APPAREILS DE COMBUSTION DOMESTIQUE UTILISANT LA BIOMASSE.

23/04/2012

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par les partenaires cités dans la convention
n° 0801C0019-Coordination du projet INERIS

Coordination technique : Erwan AUTRET / Florence PROHARAM- Service Bio-
ressources – Direction Production et Energies Durables, ADEME Angers



REMERCIEMENTS

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

S. Bachellez (CTIF), J.L. Besombes (LCME), M. Bondot (Axis), F. Castagno (EIFER), F. Chopin (EIFER), S. Collet (INERIS), C. Courson (LMSPC), E. Deflorenne (CITEPA), A. Dermigny (INERIS), I. Fraboulet (INERIS), JC. Francony (LCME), C. Gaegauf (CATSE), E. Henriksen (APP), N. Karoski (INERIS), A. Kiennemann (LMSPC), C. Mabilat (EIFER), T. Mallereau (Chazelles), M.L. Rabot Querci (Supra), L. Robert (anciennement Poujoulat CERIC), C. Rogaume (LERMAB), Y. Rogaume (LERMAB), C. Schraube (EIFER), K. Truchot (CTIF), D Van Elsuve (INERIS)

Personnes ayant participé à la rédaction :

S. Bachellez (CTIF), J.L. Besombes (LCME), E. Deflorenne (CITEPA), I. Fraboulet (INERIS) ; G. Harel (INERIS), A. Kiennemann (LMSPC), J. Landreau (Poujoulat, CERIC), L. Robert (anciennement Poujoulat CERIC), C. Rogaume (LERMAB), F. Tabet (EIFER)

Personnes ayant validé le document :

N. Allemand (CITEPA), N. Alsac (INERIS), M. Bondot (Axis), S. Collet (INERIS), L. Druette (Poujoulat, CERIC), M. Durif (INERIS), T. Mallereau (Chazelles), J. Poulleau (INERIS), M.L. Rabot Querci (Supra), Y. Rogaume (LERMAB),

En français :

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

En anglais:

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

RAPPORT D'ÉTUDE 23/04/2012
N° DRC_11_96869_11144A

**Evaluation technico-économique des
meilleures techniques disponibles de
réduction des émissions de poussières
fines et de composés organiques pour
les appareils de combustion domestique
utilisant la biomasse.**

Rapport final

PRÉAMBULE

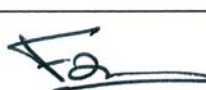
Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

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	Isaline FRABOULET	Jean POULLEAU	Nicolas ALSAC
Qualité	Responsable d'affaires Unité « Sources et émissions »	Responsable de l'Unité « Sources et émissions »	Direction des Risques Chroniques Responsable du pôle « Caractérisation de l'environnement »
Visa			

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION»	21
1.1 CONTEXTE	21
1.2 OBJECTIFS	21
2. ACTIONS ET PRODUITS DE SORTIE DU PROJET EN BREF	25
3. BILAN DES ACTIONS	27
3.1 BILAN DES CONNAISSANCES (ACTION 1)	27
3.1.1 <i>Principe et objectifs</i>	27
3.1.2 <i>Synthèse des émissions de la combustion du bois</i>	27
3.1.2.1 Polluants émis	28
3.1.2.2 Contexte réglementaire	29
3.1.2.3 Données de caractérisation des émissions	29
3.1.2.3.1 Paramètres d'influence des émissions	29
3.1.2.3.2 Etude des phases de la combustion	30
3.1.2.3.3 Facteurs d'émission	31
3.1.3 <i>Bilan des techniques de réduction</i>	32
3.1.3.1 Mesures primaires de réduction des polluants de la combustion bois domestique	32
3.1.3.2 Mesures secondaires de réduction des polluants de la combustion bois domestique	34
3.1.3.2.1 Facteurs de performance	34
3.1.3.2.2 Présentation des différentes technologies de réduction	35
Filtres électrostatiques	35
Echangeurs condenseurs & laveurs	35
Cyclones et rotateurs	37
Filtres à manches	38
Filtres catalytiques	38
Filtres céramiques et à bain d'huiles	39
3.1.3.2.3 Données de performance disponibles dans la littérature au démarrage du projet Peren2Bois	40
Laveur-condenseur	40
Echangeur-condenseur	40
Filtres électrostatiques	40
Filtres catalytiques	41
3.1.3.2.4 Données de performance mises en commun par les partenaires au démarrage du projet Peren2Bois	42
3.1.3.2.5 Sélection des technologies de réduction et couplages à évaluer dans le cadre de l'action 4	43
Choix des filtres	43
3.2 TECHNIQUES ET PROTOCOLES DE MESURAGE (ACTION 2)	45
3.2.1 <i>Contexte et objectifs</i>	45
3.2.2 <i>Etude du prélèvement de la fraction solide</i>	46
3.2.2.1 Etude des paramètres d'influence	46
3.2.2.2 Essais d'intercomparaison	47
3.2.3 <i>Etude du prélèvement de la fraction condensable</i>	49
3.2.3.1 Comparaison des méthodes US EPA 5H et EN TS 15439 : 2006	49
3.2.3.2 Comparaison de la méthode candidate DIN+/EN TS 15439 : 2006 et du tunnel à dilution (NS 3058-2)	51
3.2.4 <i>Conclusion</i>	53
3.3 ETUDE DES TECHNIQUES PRIMAIRES ET SECONDAIRES DE REDUCTION (ACTIONS 3 ET 4)	53
3.3.1 <i>Influence des matériaux et catalyse</i>	53
3.3.1.1 Objectif	53
3.3.1.2 Influence des matériaux de construction	54
3.3.1.2.1 Caractérisation des émissions avec réglage air primaire	56
3.3.1.2.2 Caractérisation des émissions avec réglages air primaire et secondaire	57
3.3.1.3 Appareils à catalyse	57
3.3.1.4 Etude bibliographique critique des différentes solutions catalytiques	58

3.3.1.5	Tests comparatifs de combustion sur des appareils équipés ou non d'un système catalytique...	58
3.3.2	<i>Etude des techniques secondaires de traitement</i>	59
3.3.2.1	Principe et objectifs.....	59
3.3.2.2	Presentation des filtres testés.....	61
	Rüegg - Zumikron.....	61
	MoreCat – Der Ofenkatalysator.....	62
	APP - R_ESP : filtre électrostatique haut de cheminée.....	63
	ACS- ReCyclone.....	63
3.3.2.3	Synthèse comparative des techniques secondaires de traitement des fumées évaluées.....	64
3.3.2.3.1	Performances d'épuration.....	64
	Performances des électrofiltres.....	65
	Performance du prototype cyclone Hurricane.....	66
	Performance du filtre catalytique Ofenkatalysator.....	66
3.3.2.3.2	Comparaison avec les données existantes.....	67
3.3.2.3.3	Comparaison technique, économique et pratique des techniques secondaires.....	68
	Avantages et inconvénients des techniques testées.....	68
	Evaluation comparative.....	71
	Performance de réduction.....	72
	Performance de réduction.....	72
	Mise en œuvre.....	72
	Coût d'acquisition et de fonctionnement.....	73
	Esthétique.....	74
	Potentiel d'amélioration.....	74
3.3.3	<i>Synthèse relative à l'utilisation des techniques primaires et secondaires de réduction</i>	76
3.3.3.1	Influence des matériaux associés aux réglages d'air.....	76
3.3.3.1.1	Performances de réduction.....	76
3.3.3.1.2	Contraintes économiques et durée de vie des matériaux de construction.....	77
3.3.3.2	Perspectives et recommandations d'utilisation des catalyseurs.....	78
3.3.3.3	Synthèse des résultats obtenus pour les techniques secondaires.....	80
3.4	FACTEURS D'EMISSIONS ET HIERARCHISATION DES PHASES DU PROCESSUS DE COMBUSTION EN TERMES D'EMISSION DE POLLUANTS (ACTION 4).....	82
3.4.1	<i>Sans système de traitement secondaire des fumées</i>	82
3.4.2	<i>Avec système de traitement secondaire des fumées</i>	84
3.4.2.1	Hierarchisation des émissions de polluants gazeux des appareils de chauffage domestiques.....	87
3.4.2.1.1	Particules (TSP).....	88
3.4.2.2	Comparaison des facteurs d'émission déterminés avec ceux collectés dans le cadre de l'action 1	90
3.4.2.2.1	Comparaison des Facteurs d'émissions globaux.....	90
	Facteurs d'émission déterminés pour la fraction solide des particules totales :.....	94
	Facteurs d'émission déterminés pour les HAP.....	94
	Facteurs d'émission déterminés pour les COVT et le CO.....	94
	Conclusions sur la comparaison des facteurs d'émission.....	95
3.4.2.2.2	Comparaison des Facteurs d'émissions selon les phases de combustion.....	95
3.5	ACTION 5 : UTILISATION POTENTIELLE D'INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX POUR EVALUER LES POLITIQUES DE REDUCTION DES EMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES.....	96
3.5.1	<i>Les indicateurs de la combustion de biomasse</i>	96
3.5.2	<i>Objectifs</i>	97
3.5.3	<i>Méthodologie</i>	97
3.5.4	<i>Résultats</i>	98
3.5.4.1	Facteurs d'émission.....	98
	<dl : inférieur à la limite de détection, nd : non déterminé.....	99
3.5.4.2	Répartition Gaz particule du Levoglucosan à l'émission.....	99
3.5.4.3	Effet des techniques de réduction primaires et secondaires sur les émissions de Lévo-glucosan.....	101
3.5.4.3.1	Influence des matériaux et catalyse (Action 3).....	101
3.5.4.3.2	Techniques de traitement secondaire (Action 4).....	102
3.5.5	<i>Conclusion relative à l'utilisation d'indicateurs environnementaux pour évaluer les politiques de réduction</i>	104
3.5.6	<i>Valorisation industrielle des résultats du programme Peren²Bois (Action 6)</i>	105
3.5.6.1	Objectif.....	105
3.5.6.2	Fiches de bonnes pratiques.....	105
3.5.7	<i>Recommandations aux industriels</i>	106

4.	CONCLUSION.....	111
5.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES, NORMATIVES ET REGLEMENTAIRES	115
6.	LISTE DES ANNEXES.....	119

LISTE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1 : EFFICACITE DE FILTRATION DU ZUMIKRON MESUREE SUR 4 INSTALLATIONS TERRAIN (SOURCE : CATSE)	40
FIGURE 2 : REPARTITION EN TAILLE DES PARTICULES AVANT/APRES LE FILTRE SFF EN FONCTION DE L'ESSENCE (SOURCE : TFZ) ..	41
FIGURE 3 : RESULTATS DE LA MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE ALLEMANDE DITE « SIMPLIFIEE » SUR TROIS PLATES-FORMES D'ESSAIS.....	47
FIGURE 4 : SCHEMA DE PRINCIPE DE REALISATION DES ESSAIS DE COMPARAISON ENTRE LA METHODE US EPA 5H ET LA METHODE CEN/TS 15439 : 2006.....	50
FIGURE 5 : COMPARAISON DES RESULTATS DE MESURAGE DE CONCENTRATION TOTALE (FRACTIONS SOLIDE ET CONDENSABLE) DE L'AEROSOL EMIS PAR LE POELE A BUCHES OBTENUS AVEC LA METHODE SIMPLIFIEE BASEE SUR LA METHODE DIN+/EN TS 15439 : 2006 ET LE TUNNEL A DILUTION	52
FIGURE 6 : COMPARAISON DES RESULTATS DE MESURAGE DE CONCENTRATION TOTALE (FRACTIONS SOLIDE ET CONDENSABLE) DE L'AEROSOL EMIS PAR LE POELE A GRANULES OBTENUS AVEC LA METHODE SIMPLIFIEE BASEE SUR LA METHODE DIN+/EN TS 15439 : 2006 ET LE TUNNEL A DILUTION	52
FIGURE 7 : APPAREILS TESTES DANS LE CADRE DE L'ACTION 3.1	55
FIGURE 8 : MORECAT – DER OFENKATALYSATOR (SOURCE: MORECAT GMBH)	62
FIGURE 9 : COUPE ET VUES DU R_ESP D'APP (SOURCE: APP AS)	63
FIGURE 10 : PRINCIPE DU RECYCLONE AVEC CONCENTRATION ELECTROSTATIQUE (GAUCHE) ET IMAGE DU HURRICANE DE 80 M ³ /H (DROITE) (SOURCE: ACSYSTEMS)	64
FIGURE 11 : PERFORMANCES D'ÉPURATION DES TECHNIQUES SECONDAIRES ÉVALUÉES.....	65
FIGURE 12 : COMPARAISON TECHNIQUE, ÉCONOMIQUE ET PRATIQUE DES TECHNIQUES SECONDAIRES ÉVALUÉES.....	80
FIGURE 13 : FACTEURS D'ÉMISSION MASSIQUES POUR LES TSP, HIERARCHISES SELON LES PHASES DE COMBUSTION ET LES APPAREILS DE CHAUFFAGE UTILISÉS	89
FIGURE 14 : FACTEURS D'ÉMISSION ÉNERGETIQUES POUR LES TSP, HIERARCHISES SELON LES PHASES DE COMBUSTION ET LES APPAREILS DE CHAUFFAGE UTILISÉS	89
FIGURE 15 : COMPARAISON* DES FACTEURS D'ÉMISSION DÉTERMINÉS POUR LA FRACTION SOLIDE DES PARTICULES TOTALES	92
FIGURE 16 : COMPARAISON* DES FACTEURS D'ÉMISSION DÉTERMINÉS POUR LES HAP	92
FIGURE 17 : COMPARAISON DES FACTEURS D'ÉMISSION DÉTERMINÉS POUR LES COVT	93
FIGURE 18 : COMPARAISON DES FACTEURS D'ÉMISSION DÉTERMINÉS POUR LE CO	93
FIGURE 19 : FRACTION PARTICULAIRE DE LEVOGLUCOSAN ET TEMPÉRATURE DES FUMÉES POUR LES ESSAIS AVEC DES DISPOSITIFS DE TRAITEMENT SECONDAIRE	100
FIGURE 20 : FRACTION PARTICULAIRE DE LEVOGLUCOSAN OBTENUE SUR LES TESTS DE MATÉRIEAUX ET DE TRAITEMENT PAR CATALYSEUR.....	101
FIGURE 21 : RAPPORTS DES CONCENTRATIONS EN LEVOGLUCOSAN ET EN TC (A 13% DE O ₂) MESURÉES EN AVAL SUR LES CONCENTRATIONS EN AMONT DU DISPOSITIF DE TRAITEMENT. DANS LE CAS DE L'ÉTUDE CERIC 2011, LE RAPPORT A ÉTÉ CALCULÉ ENTRE LES CONCENTRATIONS MESURÉES SANS CATALYSEUR ET LES CONCENTRATIONS MESURÉES EN PRÉSENCE DU CATALYSEUR.....	103
FIGURE 22 : RAPPORTS DES CONCENTRATIONS EN OC, EC ET TC (A 13% DE O ₂) MESURÉES EN AVAL SUR LES CONCENTRATIONS EN AMONT DU DISPOSITIF DE TRAITEMENT. DANS LE CAS DE L'ÉTUDE CERIC 2011, LE RAPPORT A ÉTÉ CALCULÉ ENTRE LES CONCENTRATIONS MESURÉES SANS CATALYSEUR ET LES CONCENTRATIONS MESURÉES EN PRÉSENCE DU CATALYSEUR.....	104
TABLEAU 1 : SYNTHÈSE DES PRODUITS DE SORTIE ISSUS DU PROJET PEREN2BOIS.....	25
TABLEAU 2 : COMPARAISON DES DONNÉES COLLECTÉES AUPRÈS DES PARTENAIRES DU PROJET AVEC LES FACTEURS D'ÉMISSION UTILISÉS PAR LE CITEPA POUR RÉALISER LES INVENTAIRES NATIONAUX D'ÉMISSIONS	31
TABLEAU 3 : LISTE DES TESTS DONT LES RÉSULTATS ONT ÉTÉ MIS EN COMMUN LORS DE L'ACTION 1	42
TABLEAU 4 : LISTE DES SYSTÈMES DE TRAITEMENT RETENUS AU TERME DE L'ACTION 1.....	43
TABLEAU 5 : COUPLAGES APPAREIL SYSTÈME DE TRAITEMENT TESTÉS DANS L'ACTION 4	44
TABLEAU 6 : RÉSULTATS OBTENUS POUR LES DIFFÉRENTS PARAMÈTRES TESTÉS	46
TABLEAU 7 : PARAMÈTRES DE MISE EN ŒUVRE DE LA METHODE SIMPLIFIEE.....	47
TABLEAU 8 : GAZ NON CONDENSABLES, COV ET RENDEMENT ÉNERGETIQUE – COMBUSTION EN AIR PRIMAIRE	56
TABLEAU 9 : GAZ NON CONDENSABLES, COV ET RENDEMENT ÉNERGETIQUE – COMBUSTION EN AIRS PRIMAIRE ET SECONDAIRE.	57
TABLEAU 10 : ÉMISSIONS DE TSP EN MASSE CORRIGÉES A 13 % D'OXYGÈNE – COMBUSTION EN AIR PRIMAIRE ET SECONDAIRE.	57
TABLEAU 11 : GAZ NON CONDENSABLES, COV ET RENDEMENT ÉNERGETIQUE – INTÉRÊT DU CATALYSEUR SUR INSERT FONTE.....	59
TABLEAU 12 : ÉMISSIONS DE TSP EN MASSE CORRIGÉES A 13 % D'OXYGÈNE – INTÉRÊT DU CATALYSEUR SUR INSERT FONTE	59

TABLEAU 13 : COUPLES : APPAREILS DE CHAUFFAGE / DEPOUSSIÈREURS ÉVALUÉS LORS DES CAMPAGNES D'ESSAIS	60
TABLEAU 14 : SPÉCIFICATIONS DU RÜEGG – ZUMIKRON (SOURCE: RÜEGG AG)	61
TABLEAU 15 : SPÉCIFICATIONS DU MORECAT – DER OFENKATALYSATOR (SOURCE: MORECAT GMBH)	62
TABLEAU 16 : SPÉCIFICATIONS DU R_ESP	63
TABLEAU 17 : COMPARAISON DES DONNÉES D'EFFICACITÉ AVEC LES DONNÉES EXISTANTES	67
TABLEAU 18 : AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉLECTROFILTRE ZUMIKRON	68
TABLEAU 19 : AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE L'ÉLECTROFILTRE R_ESP	69
TABLEAU 20 : AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU CYCLONE HURRICANE	70
TABLEAU 21 : AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU FILTRE CATALYTIQUE OFENKATALYSATOR	71
TABLEAU 22 : ÉVALUATION COMPARATIVE EN TERMES DE PERFORMANCE D'ÉPURATION	72
TABLEAU 23 : ÉVALUATION COMPARATIVE EN TERMES DE CONTRAINTES DE MISE EN ŒUVRE	73
TABLEAU 24 : COUT D'ACQUISITION DES TECHNIQUES TESTÉES	74
TABLEAU 25 : SYNTHÈSE DE L'ÉVALUATION COMPARATIVE DES TECHNIQUES TESTÉES	80
TABLEAU 26 : FACTEURS D'ÉMISSIONS POUR LES PARTICULES ÉMIS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUE LORS DE LA COMBUSTION VIVE (MOYENNE ± IC 95 %)*RAMÈNE À LA MASSE DE BOIS SEC	82
TABLEAU 27 : FACTEURS D'ÉMISSIONS POUR LES POLLUANTS GAZEUX ET HAP ÉMIS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUE (MOYENNE ± IC 95 %)*RAMÈNE À LA MASSE DE BOIS SEC	83
TABLEAU 28 : FACTEURS D'ÉMISSIONS ÉNERGETIQUES POUR LES PARTICULES ÉMIS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUE (MOYENNE ± IC 95 %)	83
TABLEAU 29 : FACTEURS D'ÉMISSIONS ÉNERGETIQUES POUR LES POLLUANTS GAZEUX ET HAP ÉMIS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUE (MOYENNE ± IC 95 %)	83
TABLEAU 30 : FACTEURS D'ÉMISSIONS MASSIQUES POUR LES PARTICULES ÉMIS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUE FONCTIONNANT AVEC L'ÉLECTROFILTRE R_ESP (MOYENNE ± IC 95%)	85
TABLEAU 31 : FACTEURS D'ÉMISSIONS ÉNERGETIQUES POUR LES PARTICULES ÉMIS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUE FONCTIONNANT AVEC L'ÉLECTROFILTRE R_ESP (MOYENNE ± IC 95%)	85
TABLEAU 32 : FACTEURS D'ÉMISSIONS MASSIQUES POUR LES POLLUANTS GAZEUX ET HAP ÉMIS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUE FONCTIONNANT AVEC L'ÉLECTROFILTRE R_ESP (MOYENNE ± IC 95%)	85
TABLEAU 33 : FACTEURS D'ÉMISSIONS ÉNERGETIQUES POUR LES POLLUANTS GAZEUX ET HAP ÉMIS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUE FONCTIONNANT AVEC L'ÉLECTROFILTRE R_ESP (MOYENNE ± IC 95%)	86
TABLEAU 34 : FACTEURS D'ÉMISSIONS MASSIQUES POUR LES PARTICULES ÉMIS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUE FONCTIONNANT AVEC LE FILTRE CATALYTIQUE OFENKATALYSATOR (MOYENNE ± IC 95%)	86
TABLEAU 35 : FACTEURS D'ÉMISSIONS ÉNERGETIQUES POUR LES PARTICULES ÉMIS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUE FONCTIONNANT AVEC LE FILTRE CATALYTIQUE OFENKATALYSATOR (MOYENNE ± IC 95%)	86
TABLEAU 36 : FACTEURS D'ÉMISSIONS MASSIQUES POUR LES POLLUANTS GAZEUX ET HAP ÉMIS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUE FONCTIONNANT AVEC LE FILTRE CATALYTIQUE OFENKATALYSATOR (MOYENNE ± IC 95%)	87
TABLEAU 37 : FACTEURS D'ÉMISSIONS ÉNERGETIQUES POUR LES POLLUANTS GAZEUX ET HAP ÉMIS PAR DIFFÉRENTS TYPES D'APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUE FONCTIONNANT AVEC LE FILTRE CATALYTIQUE OFENKATALYSATOR (MOYENNE ± IC 95%)	87
TABLEAU 38 : COMPARAISON DES FACTEURS D'ÉMISSIONS (N CORRESPOND AU NOMBRE D'ESSAIS RÉALISÉS)	90
TABLEAU 39 : FACTEURS D'ÉMISSION MOYENS EN LEVOGLUCOSAN, MANNOSAN ET GALACTOSAN OBTENUS AU COURS DE L'ÉTUDE PEREN ² BOIS.	99
TABLEAU 40 : CONCENTRATIONS MOYENNES EN LEVOGLUCOSAN, CARBONE ORGANIQUE (OC), CARBONE ÉLÉMENTAIRE (EC) ET CARBONE TOTAL (TC) À 13% DE O ₂	102
TABLEAU 41 : CONCENTRATIONS MOYENNES EN LEVOGLUCOSAN, CARBONE ORGANIQUE (OC), CARBONE ÉLÉMENTAIRE (EC) ET CARBONE TOTAL (TC) À 13% DE O ₂	102
TABLEAU 42 : SYNTHÈSE DES CONTRAINTES POUVANT ÊTRE ASSOCIÉES À CHAQUE TECHNIQUE AVEC POUR CHAQUE CONTRAINTÉ LES VERROUS ASSOCIÉS ET LES POTENTIELLES SOLUTIONS*	107

LISTE DES ABRÉVIATIONS UTILISÉES

B[a]A : Benzo[a]anthracène

B[a]P : Benzo[a]pyrène

B[b]F : Benzo[b]fluoranthène

B[e]P : Benzo[e]pyrène

B[ghi]P : Benzo[ghi]pérylène

B[j]F : Benzo[j]fluoranthène

B[k]F : Benzo[k]fluoranthène

BTEX : Benzène, Toluène, Ethylbenzène et les isomères du xylènes

Chr : Chrysène

Cor : Coronène

COVT : Composés Organiques Volatiles Totaux

da : diamètre aérodynamique équivalent ; désigne le diamètre d'une sphère de masse volumique égale à 1000 kg/m^3 et ayant la même vitesse limite de chute libre que la particule complexe étudiée.

Db[a,h]A : Dibenzo[a,h]anthracène

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques

IP : Indéno[1,2,3,cd]pyrène

PM₁ : matière particulaire de diamètre aérodynamique da inférieur à $1 \mu\text{m}$

PM₁₀ : matière particulaire de diamètre aérodynamique da inférieur à $10 \mu\text{m}$

PM_{2,5} : matière particulaire de diamètre aérodynamique da inférieur à $2,5 \mu\text{m}$

R_ESP : Residential Electrostatic Precipitator

TSP : Total Suspended Particles ; ensemble des particules en suspension

RESUME

Le projet PEREN²BOIS a été réalisé pour l'ADEME dans le cadre de l'appel à projets de R&D 2008 de l'ADEME « Performances Biomasse Énergie, le chauffage domestique » avec le soutien scientifique et financier du MEDDTL. Ce projet visait à identifier et caractériser les techniques et/ou les comportements permettant de réduire les émissions de polluants particuliers et gazeux dues à la combustion du bois dans le secteur domestique.

Face à la pénurie future des énergies fossiles et dans le contexte actuel de développement des énergies renouvelables, la filière biomasse et plus particulièrement le chauffage domestique au bois apparaît comme une alternative particulièrement prometteuse. Le développement de la filière doit cependant prendre en compte la problématique environnementale qui lui est associée. En effet, la combustion domestique du bois est associée à l'émission atmosphérique d'un certain nombre de polluants gazeux et particuliers présentant un risque pour la santé : en France, la combustion du bois contribue par exemple à hauteur de 35% des émissions nationales des particules de PM 2.5 (CITEPA, 2007).

Le projet PEREN²BOIS s'inscrit dans cette nécessité d'évaluer les performances énergétiques et environnementales des meilleurs techniques disponibles de réduction des émissions dues à la combustion du bois dans le secteur du chauffage domestique, afin de contribuer à leur promotion et leur dissémination dans le parc français.

Coordonné par l'INERIS, ce projet a rassemblé 12 partenaires :

- Centres d'études : CITEPA, CTIF, EIFER, INERIS,
- Industriels : Axis, APP, Chazelles, Poujoulat -CERIC, Supra
- Laboratoires Universitaires : LCME, LERMAB, LMSPC.

Il s'est articulé autour de 6 actions (cf. convention ADEME n°0801C0019), qui ont permis :

- De mettre à jour les connaissances en termes d'émissions de polluants atmosphériques et de fournir une expertise approfondie des techniques primaires et secondaires de réduction en termes de performance, de domaines d'utilisation, de mise en œuvre et de coûts d'installation et d'exploitation ;
- D'étudier, de valider et de proposer à l'ADEME, au Syndicat des énergies renouvelables (SER) et au CEN TC295 GT5, une méthode de mesurage des fractions solide et condensable des particules totales basée sur la méthode DIN+ (1) ;
- D'évaluer un certain nombre de techniques primaires et secondaires¹ de réduction des polluants atmosphériques issus des appareils de chauffage domestique fonctionnant au bois ;

¹ Les **techniques primaires** constituent l'ensemble des mesures de réduction intervenant dans le foyer de combustion et les **techniques secondaires concernent** l'ensemble des mesures de réduction intervenant au niveau du conduit d'évacuation des fumées.

- D'approfondir l'étude des indicateurs visant à évaluer l'efficacité des politiques de réduction des émissions.
- De proposer par le biais de fiches, des éléments de bonnes pratiques visant à améliorer les comportements des utilisateurs dans le but d'optimiser l'utilisation des appareils de combustion au bois sur le plan énergétique et environnemental ;
- D'identifier les contraintes et les verrous associés à la mise en œuvre des techniques étudiées ainsi que les solutions pouvant être proposées pour y répondre.

Les principaux résultats obtenus sont présentés ci-après.

Il ressort du bilan des connaissances sur les émissions et les techniques de réduction les points suivants :

- Le niveau d'émissions associé à la combustion du bois dépend d'un très grand nombre de paramètres : qualité du bois, ancienneté et technologie de l'appareil de chauffage, installation, entretien et réglage de cet appareil, modes d'alimentation du foyer, etc. ce qui laisse entrevoir la possibilité d'une diminution de la contribution de cette filière dans les inventaires d'émission ;
- Les phases de la combustion les plus émettrices de polluants (HAP, particules fines, CO, COVM) sont celles de l'allumage et dans une moindre mesure de l'arrêt ;
- Les utilisateurs, les installateurs et les constructeurs peuvent chacun contribuer à la mise en œuvre des mesures de réduction primaire.

Parmi les techniques secondaires inventoriées, quatre d'entre elles ont été étudiées : l'électrofiltre positionnés dans le conduit ou en sortie de cheminée, le cyclone et le filtre catalytique, chacune couplée à un appareil et à un type de combustible spécifique.

Vis-à-vis de la méthode de mesurage des particules

Le bilan des connaissances a également montré (2,3) que les aérosols émis par la combustion du bois sont caractérisés par la présence en quantité importante d'espèces organiques condensables. Ces espèces générées sous forme gazeuse et liquide doivent être prises en compte car, lors du processus de refroidissement des fumées à l'atmosphère, des phénomènes de condensation et nucléation conduisent à la formation d'une quantité significative de particules fines présentes dans l'air ambiant.

Par ailleurs, le bilan des méthodes de mesurage des TSP et des fractions granulométriques des particules (PM) réalisé dans le cadre du projet, fait apparaître une certaine hétérogénéité, au niveau Européen, des protocoles suivis pour le mesurage des émissions de particules totales (TSP) issues des appareils de chauffage domestique à combustion de bois. A titre d'illustration, certaines méthodes prennent en compte ces espèces condensables alors que d'autres ne comptabilisent que la fraction solide, ce qui rend difficile toute comparaison des résultats obtenus par ces différentes méthodes de mesurage

Ce constat a conduit, à l'issue d'une série d'essais comparatifs, à proposer une méthode de mesurage des particules totales permettant la prise en compte de :

- **La fraction solide par prélèvement sur un filtre chauffé**, sur la base de la méthode autrichienne et allemande « DIN+ », communément mise en œuvre en France. Les résultats des essais ont montré que certaines simplifications proposées par la méthode « DIN+ », par rapport à la méthode de référence EN 13284-1 (4) relative à la détermination de concentrations en masse de poussières issues de sources fixes pouvaient être effectuées tels que les prélèvements non isocinétique et la non prise en compte des dépôts de particules dans la ligne de prélèvement par le rinçage de cette dernière. En revanche, il est apparu nécessaire d'assurer le contrôle et le maintien de la température à 125 °C dans la sonde de prélèvement des fumées, de manière à garantir la fiabilité et la répétabilité des résultats de détermination de la fraction solide seule.
- **La fraction condensable** : elle est collectée dans une série de barboteurs contenant de l'isopropanol située après le dispositif de filtration. Le protocole proposé s'appuie sur la norme EN TS 15439 (5) relative à la détermination des émissions issues de gazéification de la biomasse.

Cette méthode a été comparée avec succès à la méthode de référence norvégienne utilisant un tunnel à dilution (NS 3058-2) (6) lors de travaux réalisés dans le cadre des actions du CEN TC 295 GT 5 en charge du mesurage des émissions de particules issues des appareils domestiques à combustibles solides. Elle a d'autre part été proposée à l'ADEME et au SER pour être testée sur un certain nombre d'appareils afin de prendre en compte les poussières dans le calcul de l'indice Flamme Verte.

En ce qui concerne l'étude des techniques primaires et secondaires de réduction des émissions atmosphériques

- Les **techniques primaires** constituent l'ensemble des mesures de réduction intervenant dans le foyer de combustion. Deux techniques primaires ont été étudiées :
 - o Une répartition et un débit appropriés de l'air primaire et/ou secondaire dans la chambre de combustion. L'apport d'air en excès ou bien en trop faible quantité conduit à l'augmentation des émissions polluantes.
 - o L'utilisation de matériaux de construction spécifiques. Dans les conditions d'essais menés (réalisation de prototypes à partir d'un appareil en fonte), le foyer en acier et briques réfractaires, suivi de près par le foyer en fonte, sont les moins émetteurs de polluants. A condition d'adapter la géométrie du foyer, le troisième matériau testé (acier et vermiculite) peut également permettre d'obtenir de bonnes performances.

- **Entre techniques primaires et secondaires** (en fonction de leur position) figurent les systèmes catalytiques. Selon qu'ils sont intégrés directement dans le foyer ou à l'intérieur du conduit des fumées, ces systèmes permettent de limiter les pertes de charges potentielles, d'agir dans des conditions de température favorable à l'activation du catalyseur et, ainsi, de réduire de manière significative certaines émissions. Toutefois, la durée de vie de ces techniques, soumises à de fortes contraintes, risque d'être limitée.
- **Les techniques secondaires concernent** l'ensemble des mesures de réduction intervenant au niveau du conduit d'évacuation des fumées. Les résultats obtenus lors de l'étude de quatre techniques primaires sont les suivants :
 - o les électrofiltres présentent de bonnes performances vis-à-vis de la fraction solide des particules ; en revanche, ils n'ont aucune efficacité sur la fraction condensable ;
 - o le cyclone spécifiquement adapté pour le projet n'a pas bénéficié de conditions d'essais favorables. Cependant, le test réalisé a mis en évidence des phénomènes de condensation intéressants à exploiter en vue de diminuer la fraction condensable des polluants émis ;
 - o le filtre catalytique, évalué dans des conditions discriminantes du fait des performances environnementales élevées de l'appareil auquel il était associé, a néanmoins révélé une efficacité sur certains HAP ainsi que sur le CO.

Parmi ces techniques, l'électrofiltre R_ESP placé en sortie de cheminée présente le plus grand intérêt en raison de sa bonne efficacité d'épuration globale et de son, coût relativement raisonnable. Cependant, il ne permet pas de réduire les concentrations des espèces condensables émises et implique la mise en œuvre, difficilement envisageable chez les particuliers, d'un équipement sous haute tension électrique.

Enfin, des interrogations demeurent quant à l'efficacité, l'utilisation et l'entretien de ces techniques sur le long terme.

Au sujet des facteurs d'émissions

Les facteurs d'émissions (exprimés en masse de matière émise dans l'atmosphère par unité d'énergie thermique du combustible ou masse de combustible consommé) des appareils de chauffage testés avec et sans système secondaire de réduction des émissions ont été déterminés. Les facteurs d'émissions obtenus dans le cadre du projet lors de la collecte de données, d'une part, et à l'occasion des campagnes de mesurages réalisées, d'autre part, ont été comparés à ceux utilisés par le CITEPA pour réaliser les inventaires nationaux d'émissions. Les facteurs issus des campagnes de mesurages sont généralement plus faibles que ceux des inventaires nationaux. Ceci peut s'expliquer par différentes raisons :

- les facteurs d'émission utilisés par le CITEPA ont vocation à représenter les émissions de polluants en conditions réelles, alors que les données collectées dans le cadre du projet ont été obtenues dans des conditions de

laboratoires (fonctionnement optimal, bois normalisé, humidité contrôlée, etc.).

- pour les émissions de particules, l'hétérogénéité des méthodes de détermination rend difficile toute comparaison des données. Ceci renforce la nécessité d'une méthode de mesure commune au niveau européen, mise en avant par le projet EN_PME_TEST financé par l'ADEME et qui a démarré début 2012.
- les facteurs d'émission utilisés par le CITEPA pour la réalisation des inventaires ne tiennent pas compte de la nature du combustible utilisé.

Quant à l'utilisation d'indicateurs environnementaux

Dans la littérature, le mesurage du lévoglucosan dans l'air ambiant est considéré comme permettant d'évaluer la part attribuable à la combustion de biomasse dans la pollution de l'air. L'objectif du projet était de déterminer s'il pouvait être utilisé en tant qu'indicateur de l'efficacité des politiques de réduction des émissions. En effet, cette molécule, le déhydromonosaccharide, de la famille de molécules organiques issues de la dégradation thermique de la cellulose, non détecté lors de la combustion de combustibles fossiles, est le plus émis par la combustion de biomasse. Le projet PEREN²BOIS a confirmé le rôle de traceur de cette molécule pour les pollutions particulières issues de la combustion de biomasse et a complété cette approche en mettant en évidence l'intérêt de mesurer ce composé en phase gazeuse.

S'agissant des fiches de bonnes pratiques et de la valorisation industrielle des résultats

Afin de permettre aux utilisateurs d'améliorer la conduite de leurs appareils en vue d'une utilisation optimisée en termes d'énergie et d'environnement, sept fiches de bonnes pratiques ont été rédigées. Elles traitent des thèmes suivants :

- La combustion du bois,
- Les polluants atmosphériques émis par la combustion du bois,
- Les techniques de réduction des polluants,
- Le combustible,
- L'appareil et son installation,
- L'allumage manuel,
- Le fonctionnement d'un appareil et les régimes de combustion.

Enfin, sur la base des contraintes et des verrous identifiés dans le cadre du projet et afférents à la mise en œuvre des systèmes de traitement, des recommandations à l'attention de leurs fabricants visant à améliorer l'intégrabilité de ces systèmes à leur contexte d'utilisation ont été établies.

Certaines concernent l'ensemble des techniques secondaires (elles doivent être facilement démontables pour un entretien régulier et permettre le respect de l'obligation réglementaire de deux ramonages annuels). D'autres, associées à des contraintes économiques, de mise en œuvre, d'intégration au bâti et/ou d'efficacité d'épuration, sont plus spécifiques. Ainsi, par exemple, pour certains filtres, il serait important de faire évoluer la législation de manière à rendre possible une mise en pression d'une partie du conduit ou d'utilisation de haute tension.

1. INTRODUCTION

Le projet PEREN²BOIS a été financé par l'ADEME dans le cadre de l'appel à projets de R&D 2008 « Performances Biomasse Énergie, le chauffage domestique » et a également été soutenu financièrement et scientifiquement par le Bureau de la Qualité de l'Air du ministère de l'écologie (MEDDTL).

S'articulant autour de 6 actions (cf. convention ADEME n°0801C0019), il visait à identifier et caractériser les techniques et/ou les comportements permettant de réduire les émissions de polluants particulaires et gazeux dues à la combustion du bois dans le secteur domestique.

Coordonné par l'INERIS, il a rassemblé 12 partenaires :

- Centres d'études : CITEPA, CTIF, EIFER, INERIS,
- Industriels : Axis, APP, Chazelles, Poujoulat, Supra
- Laboratoires Universitaires : LCME, LERMAB, LMSPC

1.1 CONTEXTE

Face à la pénurie future des énergies fossiles et dans le contexte actuel de développement des énergies renouvelables, la filière biomasse et plus particulièrement le chauffage domestique au bois apparaît comme une alternative particulièrement prometteuse. Le développement de la filière doit cependant prendre en compte la problématique environnementale qui lui est associée. En effet, la combustion domestique du bois est associée à l'émission atmosphérique d'un certain nombre de polluants gazeux et particulaires présentant un risque pour la santé : en France, la combustion du bois contribue à hauteur de 35% des émissions nationales des particules de PM 2.5 (CITEPA, 2007).

L'ADEME, a lancé depuis 2005 un programme de recherche et développement sur le bois-énergie domestique. L'appel à intentions « Bioressources, Industries et Performances » de 2008 visait à soutenir le développement de solutions technologiques innovantes de biomasse (bioproduits, biocarburants et biomasse énergie). Porté par l'INERIS, le projet PEREN²BOIS est l'un des 7 projets ayant été retenus à l'issue du processus de sélection. Il a également bénéficié du soutien financier et scientifique du MEDDTL.

1.2 OBJECTIFS

Dans le contexte actuel de maintien et de développement de la biomasse-énergie de la minimisation de son impact environnemental et de l'amélioration de son efficacité énergétique, le projet PEREN²BOIS visait à évaluer les performances énergétiques et environnementales des meilleurs techniques disponibles de réduction des émissions dues à la combustion du bois dans le secteur du chauffage domestique. Il fait suite au projet « Evaluation de l'impact des appareils de chauffage domestique au bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur » (INERIS, LCME, CITEPA, CTSB) réalisé dans le cadre de l'appel à projet ADEME de 2005.

Il avait pour objectif d'identifier et de caractériser les comportements, les techniques et/ou les configurations d'équipements de combustion permettant de réduire les émissions de polluants particulaires et gazeux dues à la combustion du bois dans le secteur domestique.

Coordonné par l'INERIS, il rassemblait 12 partenaires :

- Centres d'études : CITEPA, CTIF, EIFER, INERIS,
- Industriels : Axis, APP, Chazelles, Poujoulat, Supra
- Laboratoires Universitaires : LCME, LERMAB, LMSPC

Il s'articulait autour de 6 actions (cf. convention ADEME n°0801C0019), dont les objectifs étaient les suivants :

- fournir une expertise approfondie des techniques primaires et secondaires de réduction en termes de performance, de domaines d'utilisation, de mise en œuvre et de coûts d'installation et d'exploitation ;
- mettre à jour les facteurs d'émissions et étudier les phases de combustion afin de déterminer les niveaux d'efficacité à atteindre par les techniques de réduction afin de respecter les futures réglementations ;
- proposer une méthode de mesurage des particules totales (TSP) pouvant être utilisée dans l'ensemble du projet et évaluer la faisabilité du mesurage des fractions granulométriques ;
- tester un certain nombre de techniques primaires et secondaires de réduction des émissions ;
- proposer des indicateurs permettant d'évaluer l'efficacité des politiques de réduction des émissions.

L'action 1 a eu pour objectif de proposer une synthèse des connaissances portant sur :

- les émissions des polluants dues à la combustion du bois
- et sur les techniques primaires et secondaires de réduction de ces émissions disponibles commercialement et/ou ne présentant pas de verrou technologique majeur.

Elle a été réalisée par le CITEPA et EIFER en collaboration avec les partenaires du programme.

Les aérosols émis par la combustion domestique du bois sont caractérisés par une contribution importante de la fraction condensable, une distribution en taille très fine. La vitesse d'écoulement des fumées est très faible. Il est nécessaire que les méthodes de mesurage mises en œuvre pour les caractériser soient adaptées à ces caractéristiques. Au démarrage du programme en 2009, les discussions au sein du CEN TC 295 GT 5, sur le thème de la méthode de mesurage des émissions de particules issues des appareils domestiques à combustibles solides, n'avaient pas abouti au choix d'une méthode commune.

Une spécification technique (TS 15883) (7) parue en 2009 mentionnait la possibilité pour les pays membres de choisir parmi trois méthodes nationales, dont la méthode autrichienne / allemande dite « DIN+ » correspondant à un prélèvement direct dans le conduit sur filtre chauffé. Cette dernière est habituellement mise en œuvre en France.

L'action 2 du programme PEREN²BOIS « Techniques et protocoles de mesurage », réalisé en partenariat entre les laboratoires CERIC, CTIF, l'INERIS, le LERMAB et les industriels Axis, Chazelles et SUPRA a eu pour objectif de retenir la méthode de mesurage la plus pertinente pour l'utiliser dans le cadre du projet, de la qualifier et de la faire connaître.

Les actions 3 et 4 ont été consacrées à l'étude des techniques primaires et secondaires de réduction des émissions de polluants atmosphériques. Deux techniques primaires de réduction des émissions de polluants, à savoir le choix de matériaux de construction des appareils appropriés, associé au réglage d'air primaire et/ou secondaire d'une part et l'utilisation d'un catalyseur dans le foyer d'autre part ont été évaluées dans le cadre de l'action 3.

Quatre techniques secondaires, sélectionnées lors de l'action 1, ont été évaluées en partenariat entre l'INERIS, le CTIF et le CERIC avec le soutien technique des partenaires industriels du projet (Chazelles, Axis, SUPRA et APP) :

- deux électrofiltres (ou précipitateurs électrostatiques) ;
- un cyclone optimisé numériquement ;
- un filtre en structure métallique avec un matériau catalytique.

Ces techniques ont été testées séparément avec différents appareils à combustibles selon les critères de performance d'épuration, de facilité de mise en œuvre et de coût de revient.

La combustion de biomasse s'accompagne d'émission importante de particules se caractérisant par des taux d'émission de carbone organique (OC) supérieurs à celles des combustibles fossiles. La recherche de traceurs ou d'indicateurs de la combustion de biomasse a donc été réalisée ces dernières années majoritairement au sein des familles chimiques qui constituent l'OC. **L'action 5** réalisée par le LCME a eu pour objectifs de déterminer les facteurs d'émissions du Levoglucosan, de l'OC et l'EC pour les dispositifs de combustion étudiés dans le projet et d'évaluer l'influence des procédés de traitement primaires ou secondaires évalués dans ce projet sur les facteurs d'émission de ces indicateurs.

L'action 6 du programme réalisée par EIFER et le CERIC en partenariat avec les autres partenaires visait à améliorer, par le biais de fiches de bonnes pratiques, l'utilisation des appareils de combustion au bois sur le plan énergétique et environnemental. Elle a également été consacrée à l'identification des contraintes et des verrous associés à la mise en œuvre des techniques primaires et secondaires étudiées ainsi que des solutions pouvant être proposées pour y répondre.

Ce rapport final présente l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre du programme Peren2Bois.

2. ACTIONS ET PRODUITS DE SORTIE DU PROJET EN BREF

Le Tableau 1 présente en résumé l'ensemble des produits de sortie rédigés dans le cadre des différentes actions du projet Peren2Bois.

Tableau 1 : Synthèse des produits de sortie issus du projet Peren2Bois

Action / Acteurs	Produits de sortie
Action 1 : Bilan des connaissances EIFER / CITEPA	« Synthèse des émissions de la combustion du bois », Transmise à l'ADEME 05/2010, acteur CITEPA « Techniques de réduction, performances et coûts associés des émissions du bois domestique », transmis à l'ADEME 05/2010, acteur EIFER « Sélection des techniques et des couplages appareils/combustible évalués dans le cadre de PEREN²BOIS », transmis à l'ADEME, acteur EIFER « Comment améliorer les performances environnementales des appareils de chauffage domestique au bois », Article paru dans Fonderie magazine Février 2010 N°2, acteur CTIF
Action 2 : Techniques et protocoles de mesurage INERIS / LERMAB / CTIF / CERIC / SUPRA	« Protocole simplifié de détermination de des poussières totales (fractions solide et condensable) émises par les appareils de chauffage domestique utilisant de la biomasse comme combustible solide », transmis à l'ADEME 11/2009, acteur INERIS « Synthèse des méthodes de mesurage et rapport d'essais campagnes de comparaison de la méthode simplifiée », transmise à l'ADEME 12/2011, acteurs partenaires action 2 - Présentation des résultats au TC 295 GT 5
Action 3 : Influence des matériaux et catalyse LERMAB / LMSPC / AXIS / CHAZELLES / SUPRA	« Influences des matériaux et catalyse - choix des matériaux », transmis à l'ADEME 12/2011, acteurs LERMAB / AXIS / CHAZELLES / SUPRA « Performances environnementales et contraintes d'utilisation de catalyseurs », transmis à l'ADEME 01/2012, acteurs LMSPC / LERMAB
Action 4 : Caractérisation des émissions pour des couplages appareils / combustibles avec et sans traitement INERIS / CTIF / CERIC / SUPRA / CHAZELLES / AXIS /	« Facteurs d'émissions et hiérarchisation des phases du processus de combustion en termes d'émission de polluants », », transmis à l'ADEME 01/2012, acteur INERIS « Performances environnementales et énergétiques, domaine d'application », contrainte d'utilisation des techniques de réduction secondaires, », transmis à l'ADEME 01/2012, acteurs partenaires action 4
Action 5 : Indicateurs LCME	« Indicateurs », Transmis à l'ADEME 01/2012, acteur LCME
Action 6 : Valorisation industrielle EIFER / CERIC/ SUPRA / CHAZELLES / AXIS / INERIS	« Fiches de bonnes pratiques, visant à limiter les émissions de poussières fines et de composés organiques, à destination des utilisateurs », transmis à l'ADEME 01/2012, acteurs partenaires action 6 ; « Recommandation pour l'élaboration d'un cahier des charges en vu de la conception d'un système de traitement », transmis à l'ADEME 01/2012, acteurs partenaires action 6 ;
Action 5 : Indicateurs LCME	« Indicateurs », Transmis à l'ADEME le 01/2012, acteur LCME
Action 6 : Valorisation industrielle EIFER / CERIC/ SUPRA / CHAZELLES / AXIS / INERIS	« Fiches de bonnes pratiques, visant à limiter les émissions de poussières fines et de composés organiques, à destination des utilisateurs », Transmis à l'ADEME le 01/2012, acteurs partenaires action 6 ; « Recommandation pour l'élaboration d'un cahier des charges en vu de la conception d'un système de traitement », Transmis à l'ADEME le 01/2012, acteurs partenaires action 6 ;

3. BILAN DES ACTIONS

3.1 BILAN DES CONNAISSANCES (ACTION 1)

3.1.1 PRINCIPE ET OBJECTIFS

Cette action avait pour objectif de proposer une synthèse des connaissances portant sur :

- les émissions des polluants dues à la combustion du bois
- les techniques primaires et secondaires de réduction de ces émissions disponibles commercialement et/ou ne présentant pas de verrous technologiques majeurs.

Elle s'est appuyée sur un travail bibliographique réalisé collégialement :

- par le CITEPA en collaboration avec l'INERIS et le LERMAB pour la synthèse des connaissances sur les émissions polluantes,
- par EIFER avec l'appui du CITEPA, du CTIF et du LERMAB pour le bilan des connaissances sur les techniques de réduction des émissions.

EIFER a, d'autre part, entrepris un bilan des résultats des tests des techniques de réduction secondaires déjà réalisés :

- par les partenaires de PEREN²BOIS ;
- par le prestataire Suisse CATSE (Center of Appropriate Technology and Social Ecology, Oekozentrum Langenbruck) ;
- lors d'une étude lancée en partenariat avec le DBFZ (Deutsches Biomasse Forschung Zentrum).

3.1.2 SYNTHÈSE DES ÉMISSIONS DE LA COMBUSTION DU BOIS

Cette action propose une synthèse des émissions dues à la combustion du bois qui s'articule autour :

- d'un bilan de la réglementation actuelle et future ;
- des résultats obtenus lors de différents tests de qualification d'appareils de chauffage au bois domestiques ;
- des paramètres influençant les émissions de polluants atmosphériques lors de la combustion du bois ;
- de l'étude des différences en termes d'émissions pouvant être observées sur les trois phases de la combustion du bois.

Cette action a fait l'objet du produit de sortie « Synthèse des émissions de la combustion du bois », qui présente l'ensemble des données collectées.

3.1.2.1 POLLUANTS EMIS

Parmi les différents polluants issus de la combustion domestique du bois on peut retenir les familles suivantes :

- Les gaz :
 - produits d'une combustion incomplète :
 - monoxyde de carbone (CO) : produit de combustion le plus présent, il est formé lors de l'étape d'oxydation du carbone du combustible,
 - composés organiques volatils (COV) : hydrocarbures formés durant les étapes d'oxydation du carbone. Le méthane est souvent mis à part car il ne contribue pas à l'effet photochimique des COV. On distingue alors le CH₄ des COVNM (non méthaniques).
 - autres :
 - oxydes d'azote (NO_x) : dans le cas de la combustion du bois domestique, seul le mécanisme NO_x combustible, consistant en l'oxydation de l'azote du combustible, entre en jeu. Les émissions restent faibles,
 - oxydes de soufre (SO_x) : consiste en l'oxydation du soufre du combustible. La teneur en soufre dans le bois est assez faible et la majorité du soufre combustible reste dans les cendres (émis notamment sous forme de sel K₂SO₄),
 - acide chlorhydrique (HCl) : la teneur en Cl du bois est très faible et la majeure partie du Cl se retrouve dans les sels (NaCl, KCl).
- Les espèces se répartissant entre les phases gazeuse et particulaire :
 - hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) : hydrocarbures formés durant le cycle d'oxydation du carbone en CO₂. et goudrons : hydrocarbures lourds qui se condensent, principalement issus de l'étape de pyrolyse du bois,
 - les particules (particulate matter –PM- en anglais) en suspension dans l'air sont issues de l'émission de matières solides, liquides ou gazeuses qui se retrouvent dans l'atmosphère sous forme d'aérosols. La granulométrie des aérosols émis est un critère important puisqu'elle est directement liée à leur impact sur la santé humaine (en pénétrant plus ou moins profondément dans le système respiratoire).

Les particules ont plusieurs origines et sont de natures différentes :

- des particules issues du foyer et entraînées par le flux : particules de cendres issues du foyer, particules de combustible non encore brûlées (poussières de bois), particules de charbon de bois (très légères car très poreuses);
- des particules émises lors de la combustion : (des aérosols constitués de sels (KCl, NaCl, K₂SO₄) et d'oxydes métalliques et formés par nucléation et condensation dans les fumées contenant des vapeurs de K, Na, Cl ou S, ainsi que de métaux lourds ; et des imbrûlés composés de suies et des hydrocarbures lourds condensés (goudrons).

3.1.2.2 CONTEXTE REGLEMENTAIRE

Un certain nombre de normes définissent les performances énergétiques et environnementales que les appareils domestiques de combustion du bois doivent atteindre. Chaque type d'appareil a une norme qui lui est propre :

- Norme NF EN 303-5 (8) pour les chaudières : cette norme établit des classes de performances en se basant sur 6 paramètres : le rendement, les émissions de CO, COVM et TSP, la puissance et le mode de chargement (manuel ou automatique).
- Norme EN 13229 (9) pour les inserts : cette norme établit le taux de CO maximal et le rendement minimal à respecter pour les inserts.
- Norme EN 13240 (10) pour les poêles : cette norme établit le taux de CO maximal et le rendement minimal à respecter pour les poêles.
- Norme EN 12815 (11) pour les cuisinières : cette norme établit le taux de CO maximal et le rendement minimal à respecter pour les cuisinières à bois.
- Norme 14785 (12) pour les poêles à granulés : cette norme établit le taux de CO maximal et le rendement minimal à respecter pour les poêles à granulés.

La charte Flamme Verte a de plus été créée afin de promouvoir la vente des appareils domestiques bois qui sont labellisés Flamme Verte. Cette charte donne les rendements minimaux et les taux de CO maximaux à respecter pour obtenir le label Flamme Verte pour les inserts, les poêles à bois et granulés et les cuisinières. En ce qui concerne les chaudières, des valeurs limites d'émissions pour deux autres polluants (TSP et COVM) sont également spécifiées.

3.1.2.3 DONNEES DE CARACTERISATION DES EMISSIONS

Les constructeurs et centres techniques participant au projet ont fourni au démarrage de l'étude les résultats des mesurages effectués en laboratoire sur différents appareils lors d'études préalables ou de tests de qualifications. Les résultats obtenus lors des tests de qualification ne concernent qu'un nombre restreint de polluants atmosphériques. En effet, les normes fixant des valeurs limites d'émission essentiellement sur le CO, c'est ce polluant qui est mesuré en priorité. Quelques résultats de mesurages sont également disponibles pour les TSP et COVM. L'exploitation de ces données a permis :

- de s'intéresser aux paramètres d'influence des émissions ainsi qu'aux phases émissives de la combustion
- de réaliser une comparaison entre les facteurs d'émission pouvant être estimés à partir de ces concentrations avec les facteurs d'émission utilisés par le CITEPA pour réaliser les inventaires nationaux d'émissions.

3.1.2.3.1 PARAMETRES D'INFLUENCE DES EMISSIONS

Ces résultats de mesurages permettent tout de même de mettre en évidence certains paramètres influençant la combustion :

- Le type d'appareil : les chaudières où la combustion du bois est réalisée dans de bonnes conditions émettent moins de CO, TSP et COVM que les autres appareils pour la même quantité de bois consommée.

- Le type de combustible : la combustion des granulés émet généralement moins de composés imbrûlés (CO, TSP et COVNM) car le conditionnement du combustible permet :
 - o Un mélange combustible/comburant optimisé,
 - o Une combustion régulière, où les phases transitoires peu favorables aux émissions sont réduites et la combustion optimisée grâce à une régulation optimale de l'air comburant.
- L'essence du bois : ce paramètre semble avoir une influence sur les émissions de polluants dont l'impact est souvent masqué par les autres paramètres lors des différents mesurages.
- L'âge de l'appareil : les appareils récents émettent moins de composés imbrûlés que les anciens en raison de l'amélioration de la technologie du foyer et de la combustion.
- Les phases de la combustion : les émissions de composés imbrûlés sont plus importantes lors du démarrage et de l'arrêt de l'appareil qu'en régime établi.

3.1.2.3.2 ETUDE DES PHASES DE LA COMBUSTION

La combustion du bois est composée de 3 phases : le démarrage (amorçage, inflammation), la combustion vive (régime établi / combustion homogène) et la combustion lente (arrêt / combustion hétérogène).

Différentes études ont été menées sur les phases de la combustion du bois. Elles mettent en évidence que les émissions de CO, COVt, TSP et CH₄ sont beaucoup plus importantes à l'amorçage et à l'arrêt qu'en régime établi. Cela peut s'expliquer par une température de foyer insuffisante pour permettre une combustion complète de la biomasse lors de ces deux phases. Cette faible température a des origines différentes en fonction de la phase de combustion :

- Pour la phase d'allumage la température est insuffisante car le foyer et ses parois n'ont pas encore eu le temps d'atteindre la température adéquate permettant un rayonnement et une cinétique de combustion optimaux.
- Pour la phase de combustion hétérogène, la température du foyer est basse car l'excès d'air est trop important. En effet, lors de la combustion hétérogène, la combustion se fait uniquement avec le carbone encore présent dans les braises alors que durant la combustion homogène, la combustion est réalisée au niveau des braises ainsi que des gaz de combustion. En utilisant la même quantité d'air pour la phase de combustion hétérogène que pour la phase de combustion homogène, l'air introduit est trop important pour la quantité de matière à brûler lors de la phase de combustion hétérogène. Cet air en excès refroidit donc la chambre de combustion et empêche l'achèvement de la combustion des composés imbrûlés générés.

L'étude de la granulométrie des poussières émises lors des différentes phases de combustion permet également de mettre en évidence que les particules émises lors de la fin de la combustion sont plus grosses (en majorité comprise entre 0,1 et 1 μm) que celles émises en début de combustion (en majorité de taille inférieure à 0,1 μm). Ceci peut s'expliquer par le fait que lors de la phase de combustion hétérogène, le foyer est refroidi par l'air comburant en excès, ce qui peut entraîner la condensation des composés et donc la formation de particules plus grosses.

3.1.2.3.3 FACTEURS D'EMISSION

Les données transmises par les partenaires du projet ont été comparées aux facteurs d'émission utilisés par le CITEPA pour réaliser les inventaires nationaux d'émissions (Tableau 2). Il est à noter que ces données ont été obtenues dans des conditions de laboratoires. Lors de ces tests, l'appareil est réglé pour un fonctionnement optimal, et le bois employé est normalisé (humidité, essence, etc.) On rappelle ici que les facteurs d'émission utilisés par le CITEPA ont pour vocation de représenter les émissions de polluants en condition réelles. Or, dans les conditions réelles, le bois employé n'est pas toujours de bonne qualité et la régulation n'est pas toujours la meilleure possible, c'est pourquoi les émissions de polluants en conditions réelles sont plus élevées. Les données présentées dans ce tableau ne sont donc pas strictement comparables et toute interprétation doit être réalisée avec précaution.

Tableau 2 : Comparaison des données collectées auprès des partenaires du projet avec les facteurs d'émission utilisés par le CITEPA pour réaliser les inventaires nationaux d'émissions

Appareil	Insert	Poêle	Chaudière
TSP fraction solide			
Moyenne FE TSP fraction solide (mesures sur filtre seul) action 1 (mg/MJ)	66 $\pm$ 28 (n*=7)	350 $\pm$ 393 (n=13)	27 $\pm$ 33 (n=9)
FE Inventaire fraction solide CITEPA performant (mesures sur filtre seul) (mg/MJ)	140	140	50
8 HAP			
Moyenne FE 8 HAP fraction solide action 1 (mg/GJ)	157 (n=1)	369 $\pm$ 500 (n=2)	-
FE Inventaire CITEPA performant 8 HAP (mg/GJ)	44,8	120,4	22,0
COVT			
Moyenne FE COVt action 1 (mg eqC/MJ)	452 $\pm$ 262 (n=9)	85,9 $\pm$ 175,2 (n=6)	14,8 $\pm$ 20,8 (n=6)
FE Inventaire CITEPA performant COVt (mg eqC/MJ)	270	270	55
CO			
Moyenne FE CO action 1 (mg/MJ)	3539 $\pm$ 3230 (n=34)	2386 $\pm$ 1902 (n=24)	555 $\pm$ 1118 (n=18)
FE Inventaire CITEPA performant CO (mg/MJ)	2500	2500	1000

(n correspond au nombre d'essais réalisés)

Pour le CO et les COVt, compte tenu des écarts types, les facteurs d'émission estimés au cours de ces tests sont relativement proches de ceux employés par le CITEPA pour les appareils performants.

Pour les particules totales, les facteurs d'émissions des inserts et des chaudières sont inférieurs à ceux employés par le CITEPA, alors que les émissions des poêles sont supérieures. Les facteurs d'émission obtenus lors de ces tests ont été considérés comme du même ordre de grandeur que ceux utilisés par le CITEPA, compte tenu de la faible taille de l'échantillon et des écarts types relevés.

Pour les HAP, le très faible nombre de mesures n'a pas permis de comparer les facteurs d'émission estimés avec les facteurs d'émission employés par le CITEPA.

3.1.3 BILAN DES TECHNIQUES DE REDUCTION

Cette action réalisée par EIFER présente un bilan des techniques primaires (à la source) et secondaires, au niveau du traitement des fumées) de réduction des émissions de polluants particulaires et gazeux, disponibles commercialement (et/ou sans verrou technologique majeur) pour les appareils de chauffage domestique à bois. Cette action indique, les coûts de la mise en œuvre de telles techniques, dans la mesure où les informations sont disponibles. L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de cette action est présenté dans le produit de sortie : « Techniques de réduction, performances et coûts associés des émissions du bois domestique »

Quand on s'intéresse aux techniques de réduction des émissions, il convient de distinguer les techniques primaires d'une part et les techniques secondaires d'autre part. Dans ce document :

- Les techniques primaires feront référence à l'ensemble des mesures de réduction intervenant dans le foyer de combustion ;
- Les techniques secondaires feront références à l'ensemble des mesures de réduction intervenant au niveau du conduit d'évacuation des fumées ;

3.1.3.1 MESURES PRIMAIRES DE REDUCTION DES POLLUANTS DE LA COMBUSTION BOIS DOMESTIQUE

Ces mesures sont classées en fonction des acteurs qui sont susceptibles de les mettre en œuvre. On distingue ainsi les acteurs suivants :

- L'utilisateur : la manière dont il utilise son appareil de chauffage au bois a un impact primordial sur les émissions. Fondamentalement, il s'agit tout d'abord :
 - o d'utiliser un combustible de qualité, c'est-à-dire du bois sec et de proscrire tout déchet, fut-il organique ;
 - o de s'assurer que l'appareil et le conduit sont correctement entretenus et nettoyés. Mettre en place un contrôle de la fréquence de ramonage et disposer d'une filière professionnelle de ramoneurs est à ce titre déterminant ;
 - o un dimensionnement approprié de l'appareil en fonction de sa destination.

D'autres facteurs comportementaux ont un très fort impact sur les émissions de la combustion du bois dans les appareils non régulés :

- o un allumage « par le haut » permettrait de réduire de 50 à 80 % les émissions de particules par rapport à un allumage traditionnel par le bas ;
- o le fonctionnement en allure réduite (charge de bois plus importante et tirette de l'entrée d'air fermée) augmente drastiquement les émissions. Ce mode de fonctionnement est à éviter autant que possible ;
- o La charge de bois ne doit pas être trop volumineuse, la taille des bûches ne doit pas être trop grande et ces dernières doivent être positionnées de manière à maximiser l'écoulement d'air entre elles. On peut atteindre des niveaux d'émissions de particules de 20 à 50 mg/m³ à 13% d'O₂ (phase de démarrage incluse) sur un poêle à bûches traditionnel lorsque ces 3 paramètres sont optimaux.

Même si le grand public est de plus en plus sensibilisé aux problèmes environnementaux, il convient donc de communiquer massivement et efficacement sur les bonnes pratiques et les bons gestes à mettre en œuvre afin de limiter les émissions.

- o L'installateur est en charge de dimensionner l'installation de chauffage par rapport aux besoins thermiques du bâtiment / des pièces (dans le cas des appareils indépendants). Il est essentiel d'éviter l'installation de systèmes surdimensionnés qui risquerait de fonctionner en allure réduite et/ou en arrêt-démarrage, avec les niveaux d'émissions très élevés qui sont associés à ce mode de fonctionnement. Les filières de formation ad hoc doivent être mises en place pour assurer une montée en compétences des installateurs sur des produits innovants, des appareils et des installations de plus en plus complexes utilisant de nouveaux combustibles (granulés, par exemple).
- o L'amélioration constante des performances des appareils de chauffage au bois par les constructeurs, visant à proposer des équipements performants et des régulations avancées en termes énergétiques et environnementaux, pourra permettre d'atteindre des niveaux d'émissions plus faibles. Celle-ci doit être associée à des informations claires auprès du consommateur indiquant les conditions d'opération optimales des appareils.

Enfin, le rôle du le législateur consiste :

- o A mettre en place une réglementation de plus en plus contraignante, accompagnée par des contrôles renforcés (tant au niveau des tests de certification des appareils que des mesurages in-situ (ramoneurs...),
- o A aider économiquement à l'investissement, le développement et le percement d'une filière moderne et performante de chauffage au bois domestique, tout en laissant aux industriels le temps de s'adapter.

3.1.3.2 MESURES SECONDAIRES DE REDUCTION DES POLLUANTS DE LA COMBUSTION BOIS DOMESTIQUE

Les systèmes actuels de traitement des fumées (techniques secondaires de réduction des émissions) et leurs coûts ont été passés en revue.

3.1.3.2.1 FACTEURS DE PERFORMANCE

Les facteurs cruciaux de performances des filtres sont les suivants :

- **Efficacité de séparation (annoncée par le constructeur) :** Le filtre doit capter une part élevée des particules en suspension, particulièrement s'il est utilisé seul, sans combinaison avec d'autres étapes de séparation utilisant d'autres technologies.
- **Taille de particules filtrées :** S'il est utilisé seul, le filtre doit pouvoir capter les particules contribuant majoritairement à l'aérosol émis par la source, c'est-à-dire dans ce cas les plus fines.
- **Pertes de charges occasionnées par le filtre :** Les pertes de charges doivent être très faibles pour les applications à tirage naturel (9, 10) des fumées. Pour les chaudières utilisant des ventilateurs servant à évacuer la fumée, les pertes de charges doivent être assez faibles pour rester en concordance avec les spécifications du constructeur concernant le système d'évacuation et minimiser la puissance consommée par le ventilateur. Le filtre peut être équipé de son propre ventilateur de tirage, ce qui engendre une consommation électrique supplémentaire.
- **Résistance à l'humidité :** Les filtres doivent pouvoir opérer dans une large gamme de conditions d'humidité et de température (températures de la fumée pouvant atteindre celle du point de rosée / taux d'humidité pouvant atteindre 100%). Par ailleurs, il est nécessaire de s'assurer d'une certaine température dans le filtre. Ceci est difficile, particulièrement durant la phase de démarrage, et peut nécessiter de by-passer le filtre ou d'ajouter un dispositif de chauffage du filtre.
- **Evacuation de la poussière (régénération) :** Les particules captées s'accumulent dans une partie spécifique du filtre. Elles doivent être évacuées de manière continue ou périodique. Les dispositifs ne nécessitant pas d'intervention périodique de l'utilisateur ou du service de maintenance sont bien sûr préférables. Si un nettoyage périodique du filtre est nécessaire, il est nécessaire d'estimer les contraintes que cela requiert, ainsi que l'influence d'un entretien tardif sur l'efficacité du filtre et la qualité de la combustion (par exemple augmentation des pertes de charges)
- **Evacuation des liquides :** Certains dispositifs de filtration comme les laveurs ou les échangeur-condenseurs accumulent les particules en suspension dans de l'eau. Ces liquides ou boues résultantes doivent être évacuées ou renouvelées continuellement ou périodiquement. Dans ce cas aussi, les contraintes occasionnées ainsi que l'impact environnemental doivent être évalués.

- **Contraintes de construction et d'installation** : Pour les applications domestiques, les filtres doivent être petits et bon marché. Ainsi les systèmes passifs sont préférables. Néanmoins des systèmes actifs, nécessitant une alimentation électrique et/ou en eau sont en développement. Il convient de s'intéresser aux contraintes d'installations ainsi qu'aux limitations potentielles à l'application de tels systèmes (par exemple disponibilité de connexions pour l'évacuation du condensat)

3.1.3.2.2 PRESENTATION DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE REDUCTION

FILTRES ELECTROSTATIQUES

Le principe des filtres électrostatiques consiste à charger les particules grâce à une électrode portée à une haute tension et à les capter lors d'une seconde étape par un champ électrique. Ces deux étapes peuvent éventuellement être combinées en une seule. Les technologies industrialisées utilisant plusieurs électrodes tubulaires ou plates exploitées dans de grands ensembles sont difficilement applicables aux chaudières de petite puissance ou aux poêles, mais des concepts simples avec seulement une électrode installée dans le conduit de fumée existent sur le marché ou sont en cours de développement. Cette technique s'utilise en combinaison avec des inserts, des poêles et des chaudières.

Avantages :

- Haute efficacité potentielle ;
- Efficace aussi pour les plus petites particules ;
- Utilisable en conditions humides et sèches ;
- Faible perte de charge ;
- Pas de composants mobiles ;
- Résistant à de hautes températures.

Inconvénients :

- Une alimentation électrique haute tension est indispensable ;
- L'utilisation de haute tension nécessite des mesures de protection ;
- Une évacuation de la matière particulaire accumulée est nécessaire, qu'elle soit manuelle ou automatique.

On distingue les électro-filtres qui se placent à la sortie de la cheminée, i.e. au dessus du toit (désigné dans la suite du document « haut de cheminée »), de ceux qui viennent se placer dans le conduit, juste derrière le poêle ou bien le long du conduit.

ECHANGEURS CONDENSEURS & LAVEURS

Ces deux types de filtres étant parfois combinés, ils seront présentés conjointement dans cette partie.

ECHANGEURS-CONDENSEURS

Le principe des condenseurs est de réduire la température des fumées à un niveau inférieur au point de rosée, ce qui amène une condensation partielle de la vapeur d'eau contenue dans les fumées. Cette baisse de température des fumées comporte deux avantages :

- D'une part, la chaleur cédée est transférée au chauffage central du bâtiment, ce qui est généralement le principal objectif de ces produits et justifie l'investissement.
- D'autre part, la vapeur d'eau condensée assure un lavage des fumées qui permet d'abaisser les concentrations de particules.

Cette technique fonctionne avec un système de chauffage permettant d'alimenter un circuit hydraulique comme une chaudière.

Avantages :

- L'augmentation de l'efficacité du système de chauffage peut justifier l'investissement,
- Peut être intégré dans une chaudière biomasse,
- Utilisable en conditions humides et sèches

Inconvénients :

- Leur utilisation n'a de sens que dans le cas d'un circuit hydraulique de chauffage avec un raccordement pour les eaux usées,
- L'efficacité de séparation dépend du taux de condensation qui dépend d'un paramètre extérieur (température de retour du circuit de chauffage),
- Grande difficulté à appliquer aux chauffages d'appoint,
- L'impact environnemental du condensat est inconnu et un problème non traité,
- Un entretien régulier est nécessaire,
- Évacuation de la matière particulaire accumulée (boue).

LAVEURS

Les laveurs utilisent de fines gouttelettes d'eau pour abaisser la concentration en particules dans les fumées. Les gouttelettes sont produites en utilisant des buses pour brumiser l'eau dans la chambre de lavage où les particules s'accumulent sur les gouttelettes. En général les gouttelettes doivent être aussi petites que possible pour atteindre une bonne efficacité sur les particules les plus fines. On obtient de telles gouttelettes en utilisant de petites buses et une eau sous haute pression. Les particules s'accumulent dans l'eau, il est donc nécessaire de les capter par décantation ou par un procédé de recyclage. Comme les échangeurs-condenseurs, cette technique fonctionne avec un système de chauffage permettant d'alimenter un circuit hydraulique comme une chaudière.

Avantages :

- Haute efficacité potentielle ;
- Possible de les combiner avec un condenseur ;
- Peut aussi absorber les émissions de composants gazeux ;
- Utilisable en conditions humides et sèches.

Inconvénients :

- Une alimentation d'eau et une conduite pour les eaux usées sont nécessaires ;
- Contrainte technique importante (pompe, recyclage de l'eau) ;
- Élimination de la matière particulaire accumulée (boue).

CYCLONES ET ROTATEURS***CYCLONES***

Les cyclones utilisent les propriétés aérodynamiques des particules pour les séparer. Leur principe est d'imposer une rotation à la circulation des fumées. La séparation a lieu par force centrifuge. Les particules accumulées sur les parois du cyclone tombent dans un bac à cendres. Ces cyclones sont de forme tubulaire. De petits diamètres améliorent leur efficacité. L'efficacité peut aussi être augmentée en combinant en parallèle plusieurs cyclones dans ce que l'on nomme des filtres « multi-cyclone ». Cyclones et multi-cyclones sont connus pour filtrer les particules au dessus de PM_{2,5}-PM₁₀, en fonction des diamètres utilisés, mais des essais ont été réalisés pour collecter les particules submicroniques, en augmentant la vitesse de l'écoulement dans le cyclone ou en insérant des structures cannelées spéciales.

Avantages :

- Structure simple
- Pas de composants actifs ou mobiles ;
- Faibles et constantes pertes de charges ;
- Évacuation de la matière particulaire accumulée facile et éventuellement automatique ;
- Résistant à de hautes températures.

Inconvénients :

- Faible efficacité pour les plus petites particules ;
- Conditions sèches nécessaires ;
- Structure volumineuse et encombrante.

ROTATEURS

Les rotateurs utilisent les forces centrifuges et gravitationnelles comme dans le cas des cyclones. La différence tient dans l'utilisation d'un composant actif, un ventilateur, qui accélère la rotation de la fumée et ainsi l'efficacité de la séparation.

Avantages :

- Utilisable en conditions humides et sèches
- Faible perte de charge.
- Résistant à de hautes températures

Inconvénients :

- Une alimentation électrique est nécessaire

FILTRES A MANCHES

Ils utilisent un film pour capter les particules de la fumée. Ce film peut être constitué de matériaux synthétiques, de fibres de verre ou de fibres de métal. Le problème du nettoyage peut être résolu soit par un décrassage automatique (air pressurisé par exemple) soit par un changement du film.

Avantages :

- Haute efficacité potentielle.
- Efficace aussi pour les plus petites particules.

Inconvénients :

- Perte de charge élevée et augmentant avec l'accumulation des particules.
- Conditions sèches nécessaires
- Gamme de température limitée (notamment dans le cas de fibres synthétiques).
- Contrainte technique importante pour l'entretien automatique.

FILTRES CATALYTIQUES

Une surface catalytique active est créée sur un support matériel (céramique, acier inoxydable). L'objectif primordial de ces systèmes catalytiques est la réduction des polluants gazeux, CO, C_xH_y ou NO_x. L'efficacité du catalyseur dépend de la température (il faut atteindre un certain niveau de température pour obtenir une meilleure efficacité). En début de combustion, lors de l'allumage de l'appareil, un by-pass permet de faire passer les fumées directement dans le conduit de fumée, ce qui limite donc l'utilité d'un tel système puisque c'est à ce moment-là que les émissions sont les plus importantes. Certains systèmes contournent ce problème en préchauffant le pain catalytique, à l'aide, par exemple, d'une résistance chauffante.

Ces systèmes peuvent aussi avoir un effet mécanique sur le piégeage de particules solides. Si le système est soumis à des températures élevées, i.e. installé au dessus de la chambre de combustion, par exemple ; il va aussi permettre de piéger et de dégrader thermiquement les particules d'imbrûlés solides.

Un tel système nécessite cependant un nettoyage régulier pour régénération (particules solides inorganiques).

Les filtres catalytiques sont caractérisés par :

- La porosité du média,
- La température d'activation du catalyseur,
- La position du catalyseur dans l'appareil/le conduit (i.e. à quelle température de fumées il va travailler),
- Au démarrage, la nécessité de by-passer le catalyseur s'il n'y a pas de préchauffage installé.

Avantages :

- Ne nécessite pas d'alimentation électrique supplémentaire ;
- Permet d'éliminer les polluants gazeux et organiques par réaction chimique ;
- Efficacité potentielle sur les particules les plus fines (filtration et ou dégradation chimique/thermique).

Inconvénients :

- Nécessite des températures d'activation élevées ($T > 350^{\circ}\text{C}$) ;
- Génère des pertes de charge.

FILTRES CERAMIQUES ET A BAIN D'HUILES

Ces principes de filtration sont assez peu développés ; une seule technique basée sur chacun de ces principes a en effet pu être identifiée. Peu de données relatives à ces principes de filtration sont disponibles.

FILTRE CERAMIQUE :

Dans le cas du filtre céramique, une céramique poreuse sépare les particules de la fumée la traversant.

FILTRE A BAIN D'HUILE

Le principe du filtre à bain d'huile est de faire passer les fumées à travers un bain d'huile, dans lequel les particules s'accumulent. A l'aide d'une pompe, l'huile circule vers un filtre au travers duquel les particules sont séparées. Une seule technique a pu être identifiée.

Inconvénients :

- Génère des pertes de charge.

3.1.3.2.3 DONNEES DE PERFORMANCE DISPONIBLES DANS LA LITTERATURE AU DEMARRAGE DU PROJET PEREN2BOIS

Peu de résultats relatifs à l'efficacité des systèmes de filtration pour la combustion bois domestique sont disponibles dans la littérature.

LAVEUR-CONDENSEUR

Avant d'être retiré de la circulation par son constructeur (Schröder), l'Hydrocube était le produit le plus connu de cette catégorie. Des résultats sont donc disponibles sur cette technologie. Les résultats détaillés les plus récents (13), obtenus sur une chaudière à granulés de paille) font état d'une efficacité de filtration de 20 – 25% en masse qui s'applique surtout aux particules supérieures à 1 μ m. L'utilisation d'une électrode d'ionisation fait passer cette efficacité à 65%.

Comme mentionné dans une étude de l'Université de Kuopio (14), les laveurs (dont l'Hydrocube) permettent aussi de piéger des gaz tels que SO₂ ou HCl assez efficacement. Cependant, ceci présente peu d'intérêt dans le cas présent puisque, les teneurs en S et en Cl du bois naturel sont faibles et les émissions de SO₂ et HCl restent très limitées.

ECHANGEUR-CONDENSEUR

Deux études (13,14) montrent que les échangeurs-condenseurs testés ont une efficacité limitée sur les particules diamètre compris entre 0,2 et 1 μ m. Les efficacités de séparation mesurées sont comprises entre 10 et 20% en masse.

FILTRES ELECTROSTATIQUES

Le Zumikron est introduit commercialement depuis plusieurs années, installé sur quelques centaines d'installation en Suisse et a fait l'objet de nombreux essais. Les résultats obtenus par CATSE sont présentés ci-dessous : le Zumikron obtient sur le terrain des efficacités de filtration, en masse, sur la fraction solide de l'aérosol comprises entre 35 et 65%.

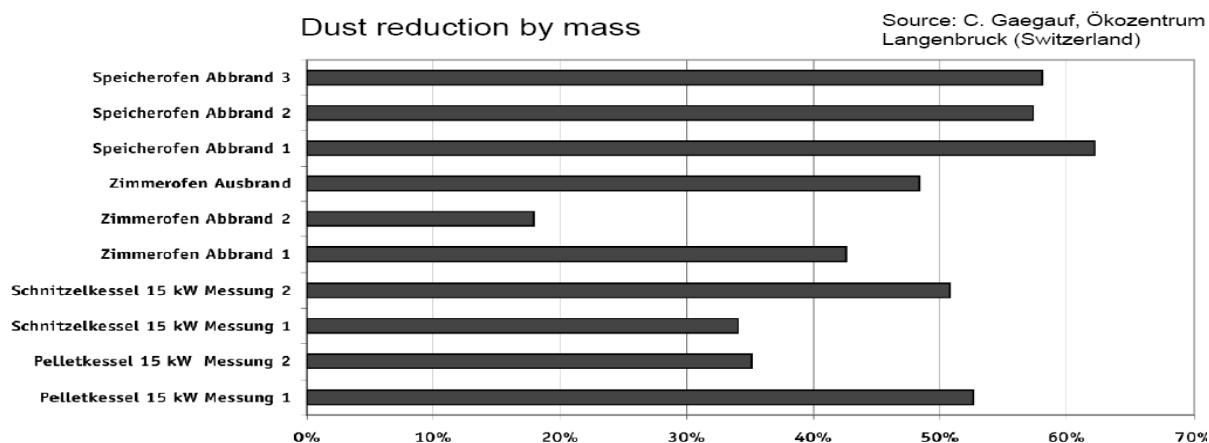


Figure 1 : Efficacité de filtration du Zumikron mesurée sur 4 installations terrain (source : CATSE)

Le filtre électrostatique SFF20 a été testé de manière relativement exhaustive en combinaison avec une chaudière à bûches par le TFZ (15). Les résultats obtenus ont montré des efficacités de séparation en masse entre 80 et 93%. La répartition des particules dans les différents modes (PM1 ; PM2,5 – PM1 ; PM10 – PM2,5 ; > PM10) avant/après le filtre montre que celui-ci agit de manière relativement semblable sur les différentes tailles de particules.

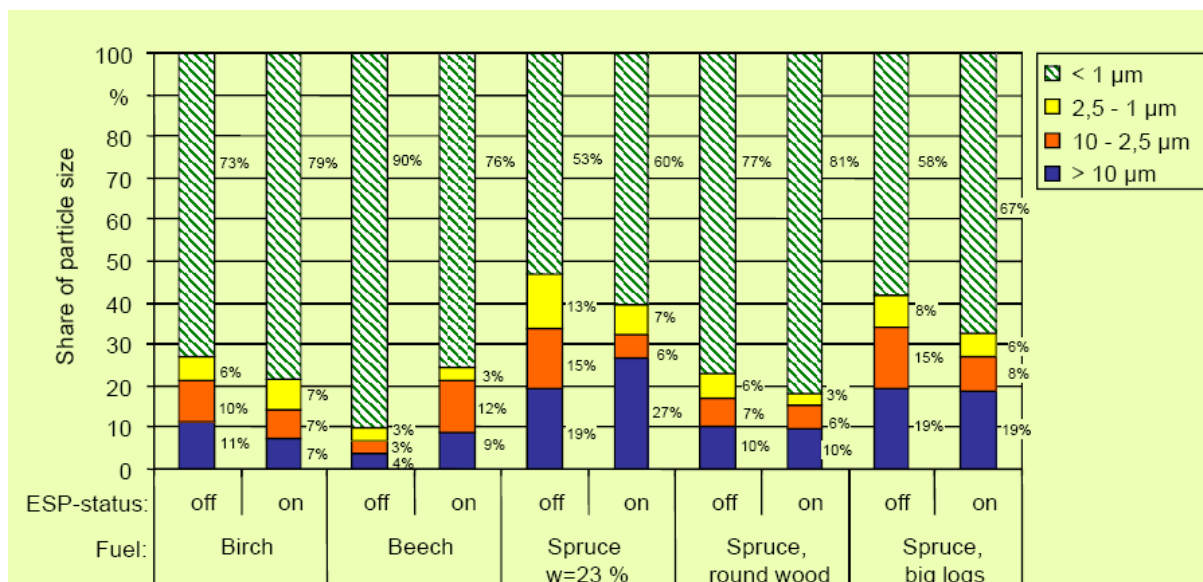


Figure 2 : Répartition en taille des particules avant/après le filtre SFF en fonction de l'essence (source : TFZ)

FILTRES CATALYTIQUES

Sur le filtre catalytique « Der Ofenkatalysator », l'IVD¹⁶ de Stuttgart a réalisé des mesures pour le compte du LUBW¹⁷ (18) avec un poêle à bûches à accumulation au laboratoire. L'IVD a déterminé une efficacité de conversion catalytique sur le CO et les COV d'environ 60% et de 50% sur des composés tels que HAP, benzène(a)pyrène et formaldéhyde.

Une étude de l'Université de Kuopio (14) fournit des résultats de tests effectués sur des poêles à bûches et à briquettes. Les efficacités de conversion catalytiques suivantes obtenues pour le bouleau sont :

- CO : 87 – 93% (valeur en entrée : env. 2000 ppm)
- CH4 : 30 – 70% (valeur entrée : 100 – 200 ppm)
- COVM : 80 – 100% (valeur entrée : qq dizaines de ppm en fonction du composé chimique)
- PAH : 20 – 50% (valeur entrée : 4000 ppm)

3.1.3.2.4 DONNEES DE PERFORMANCE MISES EN COMMUN PAR LES PARTENAIRES AU DEMARRAGE DU PROJET PEREN2BOIS

Différents résultats de mesurage ont été mis en commun (Tableau 3).

Tableau 3 : Liste des tests dont les résultats ont été mis en commun lors de l'action 1

Nom du filtre	Type de filtre	Total
R_ESP	Filtre électrostatique	12*
Der Ofenkatalysator	Filtre Catalytique	2
HydroCube	Echangeur (condenseur)-laveur	3
Öko Carbonizer 001	Echangeur	2
Ökofen built-in condenser	Echangeur	1
Ökotube	Filtre électrostatique	1
P50	Echangeur (condenseur)-laveur	4
SFF20	Filtre électrostatique	2
Spider	Filtre électrostatique	2
Zumikron	Filtre électrostatique	14
AL-Top	Filtre électrostatique	2
Grand Total		45

* correspondent aux 12 mesurages réalisés sur le terrain par le TFZ Straubing

La technique la plus diffusée actuellement est le filtre électrostatique. Il existe plusieurs systèmes vendus commercialement ou sur le point de l'être. Leurs résultats sont concluants : les efficacités de filtration sur les particules obtenues en labo sont toutes supérieures à 60% en nombre et 50% en masse ; sur le terrain les efficacités mesurées sont 5 à 10 points d'efficacité plus faibles en nombre et en masse (due à la propreté du conduit et de l'électrode, notamment). Cette technologie agit sur tout le spectre granulométrique des particules. On distingue les systèmes qui s'installent en extrémité de cheminée sur le toit (il faut alors monter sur le toit en cas de maintenance sur le système et une alimentation électrique haute tension doit y être installée) et ceux qui s'installent directement dans le conduit d'évacuation des fumées.

Pour les systèmes commercialisés, les prix évoqués sont tous dans la même fourchette (autour de 1000 €), sauf le AL-Top à 2000 €, mais qui gère la problématique de décendrage via un lavage journalier (il nécessite donc une connexion au réseau d'eau et une gestion de l'eau usée) ; les autres systèmes nécessitant le nettoyage manuel du conduit. Le SFF, qui n'est pas commercialisé gère aussi son décendrage (cendres sèches à récupérer en bas de filtre) ; c'est alors sa taille de l'appareil qui pose problème (SFF20 : h x l x p = 1050 x 470 x 390 mm).

L'autre technique relativement disponible utilise des échangeurs (condenseurs)-laveurs. Caractérisée par des efficacités de filtration relativement faibles (10 - 30 % en masse), elle ne fonctionne qu'avec une chaudière (circuit d'eau chaude nécessaire) et nécessite un système de traitement des condensats ou de l'eau de lavage. La récupération de chaleur et donc l'amélioration du rendement énergétique de l'installation est naturellement intéressante, mais est contrebalancée par le prix relativement élevé (2 000 – 3 000 €, sans le système de traitement des effluents) de ces systèmes et leur faible efficacité de filtration.

Les filtres catalytiques semblent avoir un fort potentiel sur la réduction des imbrûlés gazeux et peuvent avoir un impact sur la filtration particulaire. Le seul filtre de cette catégorie qui a été testé a montré des performances moyennes : 40% de réduction du CO.

3.1.3.2.5 SELECTION DES TECHNOLOGIES DE REDUCTION ET COUPLAGES A EVALUER DANS LE CADRE DE L'ACTION 4

CHOIX DES FILTRES

L'action 1 a retenu 8 systèmes intéressants, la plupart étant des électro-filtres.

Tableau 4 : Liste des systèmes de traitement retenus au terme de l'action 1

Fabricant	Nom du produit	Technologie	Maturité. Prix (€)	Application
Rüegg Cheminée AG	Zumikron	Filtre électrostatique	Sur le marché ~1 200 €	Poêles, chaudières
Spanner Re ² GmbH	SFF	Filtre électrostatique	-	Chaudières
ÖekoSolve AG	Öekotube	Filtre électrostatique (cheminée)	Sur le marché ~1 000 €	Poêles
Fa. Schröder	AL-Top	Filtre électrostatique	Sur le marché 2 000 €	Chaudières
Fa. Schröder	Kera-Top	Filtre céramique (avec ionisation)	En développement	Poêles
Applied Plasma Physics AS	R_ESP	Filtre électrostatique (cheminée)	Tests terrain?	Poêles, chaudières
Mr. Bolliger	Spider	Filtre électrostatique	Tests Labo/terrain ?	Poêles, chaudières
Advanced Cyclone Sytems, S.A.	ReCyclone	Cyclone avec concentration électrostatique	En développement*	Poêles, chaudières
MoreCat	Der Ofenkatalysator	Filtre catalytique	Sur le marché	Poêles, inserts

* faisabilité technique encore à valider

Cinq couples appareils - filtres devaient être testés dans l'action 4 « caractérisation des émissions pour des couplages appareils/combustibles avec et sans traitement ». En matière de techniques secondaires, la sélection a été réalisée de la manière suivante :

- R_ESP d'APP : APP est membre du projet ;
- Der Ofenkatalysator de MoreCat : seul filtre catalytique retenu ;
- Zumikron de Rüegg : le filtre le plus répandu, testé par de nombreux laboratoires ;
- ReCyclone d'ACS : seul cyclone retenu et concept intéressant à valider.

Plutôt que de choisir un 5^{ème} filtre, les membres du projet ont préféré tester un filtre (en l'occurrence le R_ESP) sur deux appareils différents. Les autres filtres listés ne font pas apparaître à priori d'avantages particuliers :

- La technologie Ökotube semble très proche du R_ESP et deux électro-filtres ont déjà été testés.
- La technologie Spider : deux électro-filtres ont déjà été testés.
- La technologie SFF est très encombrante (SFF20, i.e. pour des puissances jusqu'à 35 kW : h x l x p = 1050 x 470 x 390 mm) et n'est pas encore commercialisée.
- Les technologies de Schröder. : le Kera-Top n'est selon Schröder pas prêt à subir des tests. L'AL-Top est un produit plus mature mais deux électro-filtres ont déjà été testés, il a donc été laissé de côté.

In fine, il a été décidé de tester, dans l'action 4, les cinq couples appareils – filtres présentés dans le tableau suivant.

Tableau 5 : Couplages appareil système de traitement testés dans l'action 4

Fabricant	Produit	Technologie	Maturité	Appareil et combustible (CONSTRUTEUR)
Rüegg Cheminée AG	Zumikron	Filtre électrostatique	Sur le marché	Insert bûches
MoreCat	Der Ofenkatalysator	Filtre catalytique	Sur le marché*	Insert (foyer) bûches
APP AS	R_ESP	Filtre électrostatique (cheminée)	Tests terrain	Poêle bûches
				Poêle granulés
ACS AS	ReCyclone	Cyclone avec concentration électrostatique	En développement**	Chaudière bûches

** prototype conçu spécifiquement pour le projet

3.2 TECHNIQUES ET PROTOCOLES DE MESURAGE (ACTION 2)

3.2.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

L'objectif de cette action était de retenir la méthode de mesure la plus pertinente pour l'utiliser dans le cadre de ce projet PEREN²BOIS, la qualifier et la faire connaître.

Dans un premier temps, un bilan des méthodes de mesure des TSP et des fractions granulométriques des particules (PM) au niveau Européen et Nord Américain a été réalisé par l'INERIS avec la contribution de CATSE. Dans un second temps des travaux relatifs à la méthode Allemande / Autrichienne DIN+ ont été réalisés en partenariat entre les laboratoires CERIC, CTIF, l'INERIS, le LERMAB et les industriels Axis, Chazelles et SUPRA, ainsi qu'en collaboration avec le CEN TC295 GT5.

L'hétérogénéité, au niveau Européen, des protocoles mis en œuvre pour le mesure des émissions de particules totales (TSP) issues des appareils de chauffage domestique à combustion de bois, rend difficile toute comparaison des résultats obtenus par ces méthodes de mesure. Les discussions au sein du CEN TC295 GT5 sur le choix d'une méthode commune européenne de mesure des émissions de particules issues des appareils de chauffage au bois n'ont à ce jour atteint aucun consensus. Elles ont abouti en 2008 à la publication d'une spécification technique (TS 15883 issue du CEN TC295 GT5) proposant l'utilisation possible de trois méthodes nationales dont la méthode Allemande / Autrichienne DIN+.

Cette dernière est communément utilisée en France. Elle consiste en un prélèvement sur filtre chauffé placé à l'extérieur du conduit. Simple d'utilisation, elle présente néanmoins des inconvénients:

- Il s'agit une version simplifiée de la méthode EN 13284-1, mais l'influence des simplifications apportées sur la qualité de la mesure est peu connue,
- sa mise en œuvre est décrite dans la TS 15883 de manière lacunaire et un certain nombre d'informations sont manquantes,
- elle permet uniquement la détermination de la fraction solide de l'aérosol. Ceci est particulièrement gênant si l'on considère le fait que les aérosols émis par la combustion domestique du bois comportent une fraction condensable dont la contribution aux particules de l'air ambiant, en termes quantitatif et sanitaire, peut s'avérer très majoritaire.

L'objectif de cette action a donc été :

- d'étudier d'une part, le prélèvement de la fraction solide en évaluant l'impact d'un certain nombre de paramètres et en réalisant des essais d'intercomparaison de la méthode ;
- de proposer d'autre part, une méthode de prélèvement de la fraction condensable pouvant être associée au prélèvement de la fraction solide.

3.2.2 ETUDE DU PRELEVEMENT DE LA FRACTION SOLIDE

3.2.2.1 ETUDE DES PARAMETRES D'INFLUENCE

Une première série d'essais a consisté à réaliser des essais d'intercomparaison et à évaluer la méthode dite Allemande/Autrichienne DIN+ de mesurage des particules totales sur 5 paramètres différenciant cette méthode de la norme NF EN 13284-1.

Les paramètres testés étaient les suivants :

- o Vitesse de prélèvement ;
- o Température de prélèvement ;
- o Durée de prélèvement ;
- o Influence de la prise en compte de la variation des conditions météorologiques entre la pré-pesée et la post-pesée par la réalisation de pesées de filtres témoins ;
- o Influence de la prise en compte des dépôts en amont du filtre par la réalisation du rinçage de la portion de sonde située en amont du filtre.

Le test de chaque paramètre a fait l'objet d'au moins 5 essais réalisés en parallèle avec deux systèmes de prélèvements. Les paramètres ont été testés sur un appareil unique fonctionnant selon les mêmes conditions et alimenté par le même lot de bois. Le laboratoire accueillant les essais réalisait les prélèvements dans les conditions de la méthode simplifiée, l'INERIS prélevait en faisant varier le paramètre d'intérêt.

Le tableau suivant rassemble, pour les paramètres testés, les écarts relatifs observés entre les résultats.

Tableau 6 : Résultats obtenus pour les différents paramètres testés

Paramètre (P)	P1	P2	Ecart relatif* entre les concentrations mesurées avec P1 et P2	Observations
Température de filtration	90	150	80%	Variabilité des résultats due à un manque de maîtrise de la combustion Variabilité des résultats accentuée pour prélèvement à 90°C
Vitesse de prélèvement	4.4	Isocinétisme < 1m/s	18%	-
Prise en compte des dépôts dans la sonde (rinçage)	oui	non	5%	-
Durée de prélèvement	60	30	54%	L'écart important est sans doute lié à la grande variabilité des flux de polluants émis pendant le cycle de combustion
Prise en compte effet conditions météo sur pesées (témoins)	oui	non	1%	-

Ces essais nous ont conduits à définir les paramètres de la méthode, présentés dans le tableau suivant.

Tableau 7 : Paramètres de mise en œuvre de la méthode simplifiée

Paramètre	P1 (n >= 5 essais)
Température de filtration	125°C
Vitesse de prélèvement	4,4 m/s
Prise en compte des dépôts dans la sonde (rincage)	non
Durée de prélèvement	30 min
Prise en compte effet conditions météo sur pesées (témoins)	non

3.2.2.2 ESSAIS D'INTERCOMPARAISON

Pour ces essais les paramètres de la méthode simplifiée définis ci-dessus ont été mis en œuvre.

La méthode a été mise en œuvre 18 fois par trois laboratoires (CTIF, n=7, CERIC, n=6, LERMAB, n=5) disposant chacun d'une plate-forme d'essais, pour déterminer les concentrations en particules totales émises par l'insert C700L de Chazelles. Les concentrations moyennes issues des résultats obtenus sont présentées dans la figure suivante (Figure 3).

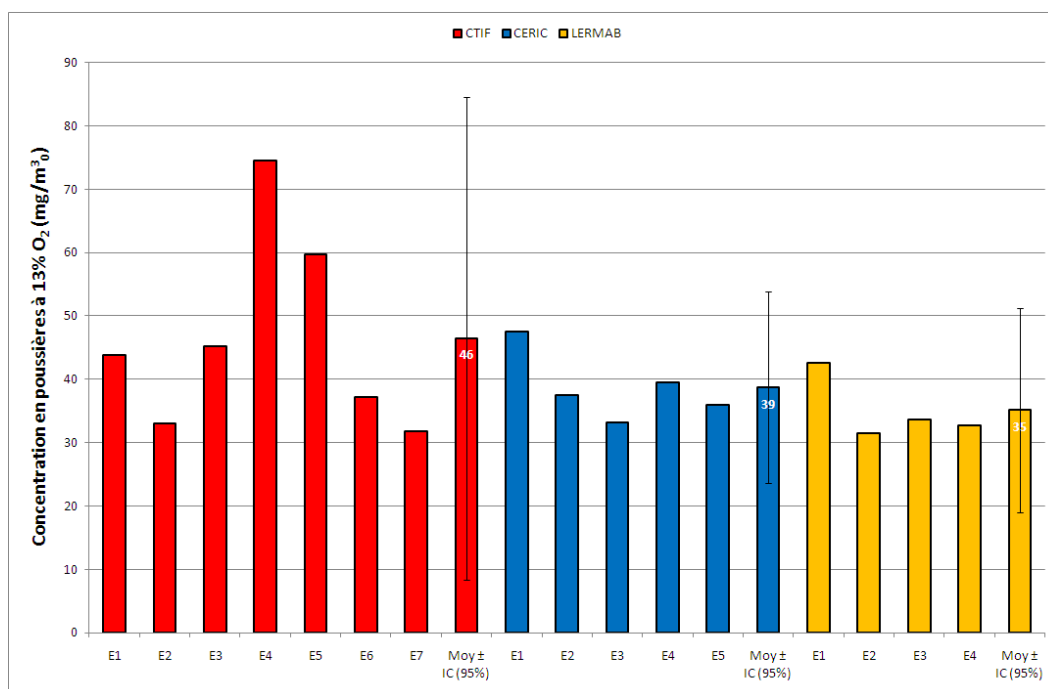


Figure 3 : Résultats de la mise en œuvre de la méthode allemande dite « simplifiée » sur trois plates-formes d'essais

Les résultats ont, par la suite, été traités selon la norme NF ISO 5725-2 relative à l'exactitude des résultats et méthodes de mesure. Il convient de rappeler que cette norme s'applique de manière conventionnelle aux résultats de mesure obtenus dans le cadre d'essais d'intercomparaison, durant lesquels un échantillon est soit envoyé à des laboratoires d'analyse et analysé au moins deux fois (répétabilité) soit fourni de manière homogène sur un banc ou site à des laboratoires mettant tous ensemble en œuvre simultanément au moins deux appareils de mesure.

On détermine alors :

- la variance intralaboratoire ou de répétabilité qui qualifie la dispersion des résultats au sein de chaque laboratoire (s_r^2) ;
- la variance interlaboratoire qui qualifie la dispersion des résultats entre les laboratoires (s_L^2) .

La somme de ces deux grandeurs donne accès à la variance de reproductibilité s_R^2 dont la racine carrée s_R correspond à l'écart type de reproductibilité de la méthode :

$$s_R^2 = s_r^2 + s_L^2$$

Les essais n'ont pu être réalisés ici strictement selon les protocoles idéaux d'application de la norme. En effet, même si les prélèvements ont été réalisés sur un appareil unique de chauffage opérant selon les mêmes conditions et alimenté par du bois issu d'un même lot, chaque laboratoire disposait d'une plate-forme d'essais propre dont les caractéristiques peuvent ne pas être strictement identiques. Il est d'autre part difficile de maîtriser suffisamment chaque cycle de combustion de façon à répéter des essais permettant d'obtenir des niveaux de concentrations identiques. Les écarts types obtenus ici correspondent donc à des écarts types « globaux » puisqu'ils englobent à la fois les écarts pouvant être dus aux plates-formes d'essais, au combustible, à la manière de gérer la combustion et à la mise en œuvre de la méthode de mesure. **Les intervalles de confiance déterminés ci-après ne peuvent donc pas être uniquement imputés à la méthode de mesure en elle-même.**

Les données traitées selon l'ISO 5725 donnent les résultats suivants:

- la dispersion intralaboratoire des résultats est supérieure à la dispersion interlaboratoire, ce qui revient à considérer que des écarts types de répétabilité et de reproductibilité identiques : 14 mg/m_0^3 correspondant à 34% de la valeur moyenne ;
- une moyenne globale à 41 mg/m_0^3 et un intervalle de confiance global à 95%, dont les bornes se situent à 14 mg/m_0^3 et 69 mg/m_0^3 .

En conclusion :

- les laboratoires donnent en moyenne des résultats proches les uns des autres, et ce, bien que les prélèvements n'aient pas eu lieu simultanément ;
- la dispersion des résultats obtenus au sein d'un même organisme est imputable à la fois à la fidélité de la méthode et à la variabilité de la qualité de la combustion (influence importante de la charge, de l'humidité, de la température dans le foyer et du combustible) ;

Si les conditions de combustion avaient été bien maîtrisées et que les émissions de poussières avaient été identiques entre les différents essais, l'incertitude de mesurage aurait été sans doute sensiblement inférieure à l'intervalle de confiance de $\pm 68 \%$ obtenu lors des essais au niveau moyen de 41 mg/m_0^3 .

3.2.3 ETUDE DU PRELEVEMENT DE LA FRACTION CONDENSABLE

Une seconde étape a consisté à définir un mode de prélèvement et d'analyse de la fraction condensable de l'aérosol en s'inspirant tout d'abord de la méthode américaine US EPA 5H, puis de la méthode EN TS 15439 : 2006. Ces deux méthodes consistent à prélever la fraction condensable de l'aérosol au moyen de barboteurs placés en aval du filtre et maintenus à faible température.

- La méthode US EPA 5H : « *Determination of particulate matter emissions from wood heaters from a stack location* »

Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un filtre chauffé à 120°C et de barboteurs remplis d'eau et placés dans un bain d'eau glacée à 0°C . Les échantillons collectés sont alors extraits au dichlorométhane, les deux phases séparées sont ensuite évaporées à sec et enfin, les indices pondéraux sont déterminés sur les extraits secs obtenus après évaporation.

La NF EN TS 15439:2006 « *Gazéification de biomasse. Goudron et particules dans les gaz produits. Échantillonnage et analyse* »

Cette méthode décrit l'utilisation de plusieurs barboteurs remplis d'isopropanol et maintenus à différentes températures. Contrairement à la méthode US EPA 5H, la méthode EN TS 15439 : 2006 ne nécessite pas d'extraction liquide. Une simple évaporation de l'isopropanol dans les conditions ambiantes est nécessaire. Ceci présente un double intérêt :

- en termes de facilité et de rapidité de traitement de l'échantillon ;
- et surtout en termes d'exposition des travailleurs, puisque le dichlorométhane utilisé dans la méthode US EPA 5H est classé comme carcinogène de type III(19) (effets carcinogènes possibles).

3.2.3.1 COMPARAISON DES METHODES US EPA 5H ET EN TS 15439 : 2006

Puisque seule la méthode US EPA 5H est une des méthodes de référence aux Etats-Unis pour la détermination des particules émises par les appareils de chauffage au bois, il a été nécessaire de réaliser des tests de comparaison permettant de vérifier si les résultats obtenus par ces deux méthodes étaient comparables.

Les deux méthodes ont été mises en œuvre en parallèle, en aval d'un filtre unique au niveau duquel la température dans le flux de gaz était mesurée et maintenue à $125 \pm 10^\circ\text{C}$. Sept prélèvements successifs ont été réalisés. Le débit et la durée de prélèvement ont été définis selon la TS 15883.

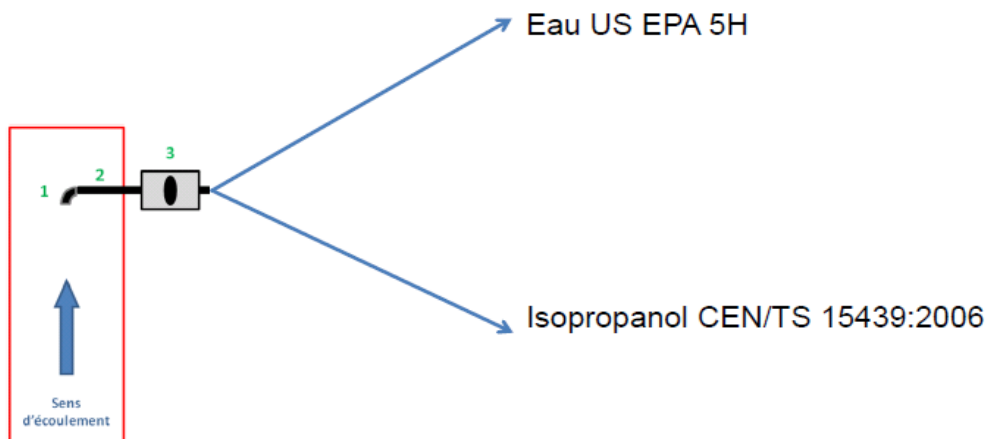


Figure 4 : Schéma de principe de réalisation des essais de comparaison entre la méthode US EPA 5H et la méthode CEN/TS 15439 : 2006

Avec un écart moyen de 12% sur les résultats de la détermination de la concentration totale (fractions solide et condensable), des deux méthodes, les résultats montrent une bonne cohérence, avec néanmoins une sous estimation quasi systématique de la méthode basée sur la EN TS 15439 : 2006 par rapport la méthode US EPA 5H. Il est à noter que cet écart pourrait être accentué dans le cas où la proportion de la fraction condensable serait plus importante que lors de ces essais de comparaison. Bien qu'un biais de 27 % ait été observé entre les deux méthodes sur la détermination de la fraction condensable, la méthode de barbotage à l'isopropanol basée sur la méthode EN TS 15439 : 2006 a été préférentiellement retenue, compte tenu des avantages apportés en termes de métrologie, de simplicité de mise en œuvre et de protection des travailleurs (suppression de l'exposition au dichlorométhane).

Les résultats très encourageants de comparaison avec la méthode US EPA 5H nous ont conduits à proposer cette méthode :

- o à l'ADEME et au SER afin qu'elle soit testée sur un certain nombre d'appareils dans le cadre de l'intégration du paramètre poussière aux contrôles Flamme Verte
- o en tant que méthode candidate pour le mesurage des émissions de particules dans le cadre des travaux de normalisation du groupe CEN TC 295 GT5 relatif aux méthodes de mesurage des émissions issues des appareils de chauffage domestique au bois.

3.2.3.2 COMPARAISON DE LA METHODE CANDIDATE DIN+/EN TS 15439 : 2006 ET DU TUNNEL A DILUTION (NS 3058-2)

La méthode candidate construite comme une combinaison des méthodes DIN+ et EN TS 15439 modifiées ainsi que la méthode norvégienne avec tunnel à dilution (NS 3058-2) ont été évaluées dans le cadre du CEN lors d'essais d'intercomparaison effectués à SSC (Stazione sperimentale per i Combustibili, Italie). Les deux méthodes ont été simultanément mises en œuvre sur deux appareils à combustibles :

- Poêle à bûches Stovax Riva 66 dont la puissance varie entre 2,4 et 8 kW : 5 essais.
- Poêle à granulés Palazzetti Ecofire Monica dont la puissance nominale varie entre 6 et 9 kW : 4 essais.

Les résultats obtenus pour la concentration en poussières totales en fonction de la méthode de prélèvement utilisée pendant les essais effectués sur le poêle à bûches et le poêle à granulés sont respectivement reportés en Figure 5 et Figure 6 en page suivante.

➤ Poêle à bûches

Les essais effectués sur le poêle à bûches révèlent une très bonne concordance des concentrations mesurées par les deux méthodes. La moyenne des valeurs absolues des écarts est estimée à 13% par rapport à la concentration mesurée par la méthode simplifiée DIN+/EN TS 15439. Les écarts observés ne présentent pas de significativité statistique puisque la p-value calculée est de l'ordre de 27 % (test de Student apparié bilatéral).

➤ Poêle à granulés

Hormis pour le premier essai, les concentrations totales en poussières mesurées par les deux méthodes sont concordantes. Il est raisonnable de penser qu'une erreur ait pu survenir lors du premier essai en ce qui concerne le tunnel à dilution étant donné qu'il est fort peu probable que la concentration totale en poussière soit moins importante pour des essais de combustion à allure réduite que pour d'autres à allure nominale. Eu égard au faible nombre de données pouvant être considérées, un test statistique n'aurait ici pas beaucoup de sens pour caractériser la réciprocité des deux méthodes. Seule la moyenne des valeurs absolues des écarts a donc été calculée pour les essais 2, 3 et 4 : 7 % par rapport à la concentration mesurée par la méthode simplifiée DIN+/EN TS 15439.

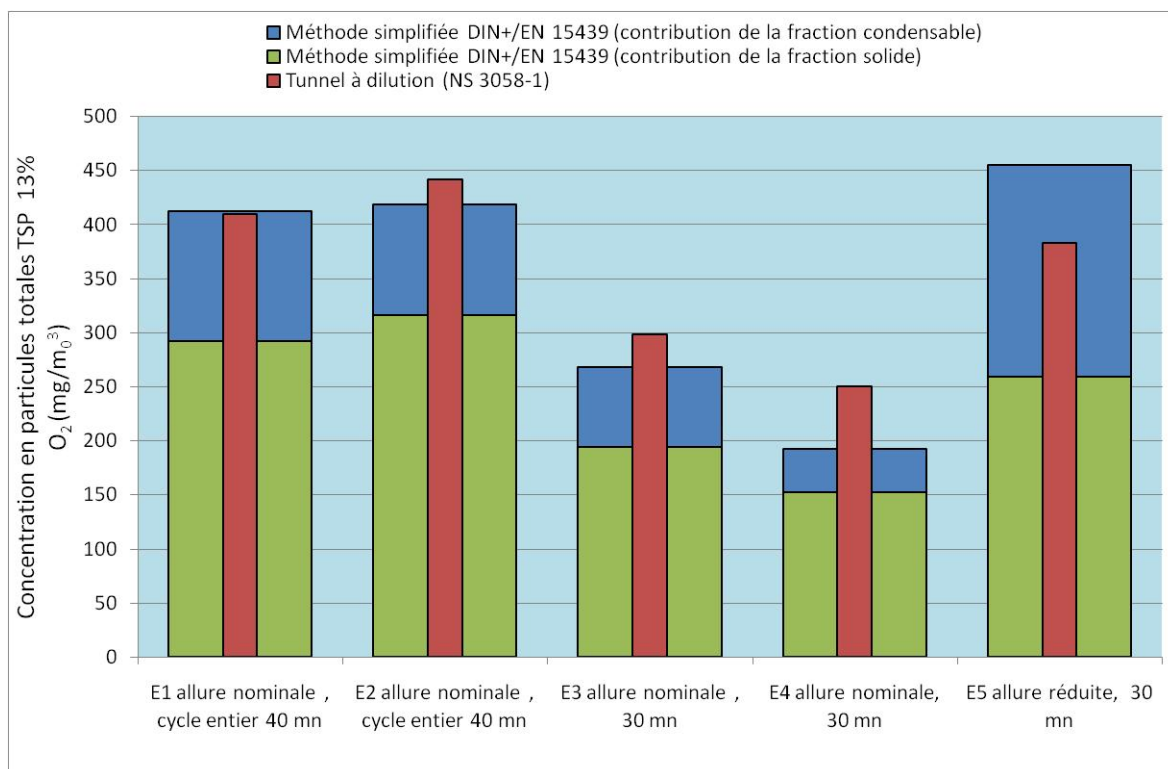


Figure 5 : Comparaison des résultats de mesurage de concentration totale (fractions solide et condensable) de l'aérosol émis par le poêle à bûches obtenus avec la méthode simplifiée basée sur la méthode DIN+/EN TS 15439 : 2006 et le tunnel à dilution

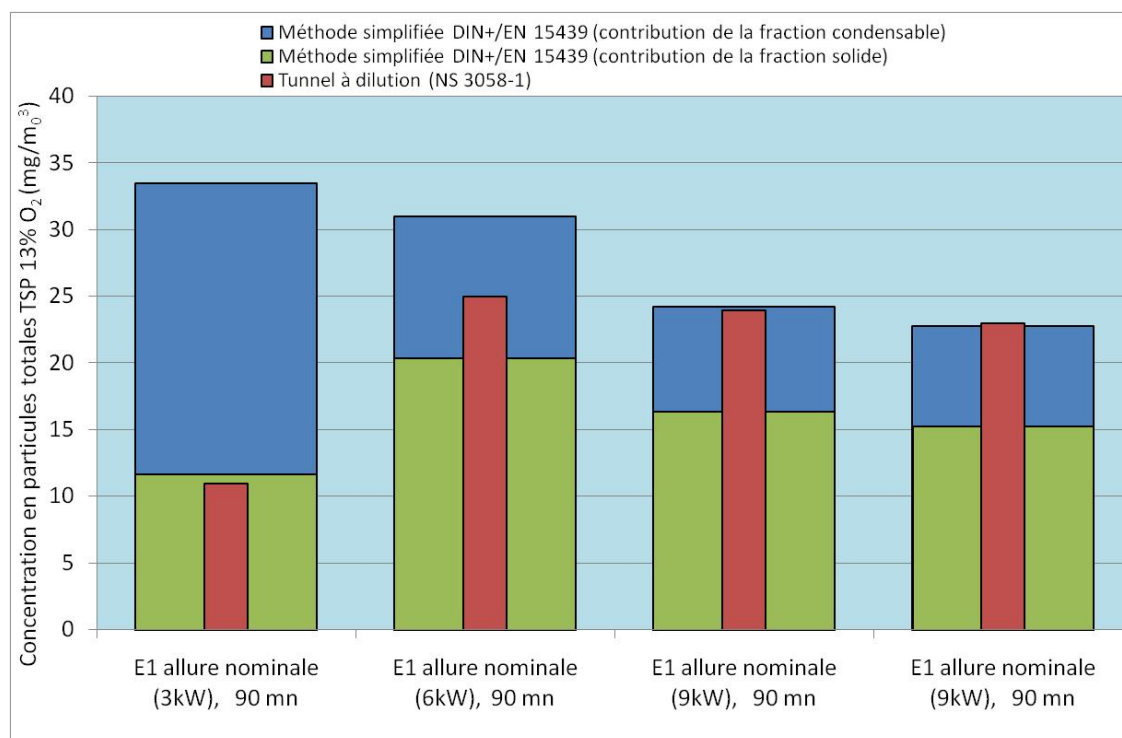


Figure 6 : Comparaison des résultats de mesurage de concentration totale (fractions solide et condensable) de l'aérosol émis par le poêle à granulés obtenus avec la méthode simplifiée basée sur la méthode DIN+/EN TS 15439 : 2006 et le tunnel à dilution

En conclusion, les essais d'intercomparaison ont révélé une très bonne correspondance des résultats entre la concentration totale en particules mesurée sur le filtre en aval du tunnel à dilution et la somme des concentrations mesurées pour la fraction solide sur filtre et la fraction condensable par la méthode à barboteurs (méthode simplifiée DIN⁺/EN TS 15439).

3.2.4 CONCLUSION

La méthode présentée ici et développée dans le cadre du projet Peren2bois propose une détermination indépendante des fractions solide et condensable des aérosols émis par les appareils de chauffage domestique fonctionnant au bois. Elle repose sur l'association d'un prélèvement de la fraction solide sur un filtre chauffé basée sur la méthode allemande DIN⁺, version simplifiée de la NF EN 13284-1 décrite dans la CEN TC 295 TS 15883 et d'un prélèvement de la fraction condensable de l'aérosol au moyen de barboteurs remplis d'isopropanol inspirée de la méthode EN TS 15439 : 2006.

Les travaux réalisés sur le prélèvement de la fraction solide ont permis de proposer des modifications du protocole DIN⁺ initial notamment sur le contrôle et le maintien de la température du flux de gaz lors de la filtration à 125°C. Des essais d'intercomparaison de la méthode réalisés dans ces conditions sur trois plateformes d'essais ont donné des résultats satisfaisants (n=18, écart type de reproductibilité 34%, ce qui correspond pour un intervalle de confiance à 95% à une incertitude élargie de $\pm 68\%$). Le prélèvement de la fraction condensable par barbotage à l'isopropanol inspiré de la méthode EN TS 15439 : 2006 a été comparé avec succès avec la méthode US EPA 5H.

Cette méthode a donc été proposée à l'ADEME et au SER pour être testée sur un certain nombre d'appareils afin de prendre en compte les poussières dans le calcul de l'indice flamme verte. Elle a d'autre part été proposée au CEN TC295 GT5 et initialement retenue parmi d'autres en tant que candidate pour la proposition d'une méthode pouvant être retenue à court terme. Les récents essais d'intercomparaison réalisés à SSC (Stazione sperimentale per i Combustibili, Italie) ont permis de mettre en évidence une bonne correspondance des résultats avec la méthode du tunnel à dilution (NS 3058-2).

3.3 ETUDE DES TECHNIQUES PRIMAIRES ET SECONDAIRES DE REDUCTION (ACTIONS 3 ET 4)

3.3.1 INFLUENCE DES MATERIAUX ET CATALYSE

3.3.1.1 OBJECTIF

L'objectif de cette action a été de tester l'impact de la mise en œuvre de deux techniques primaires de réduction des émissions de polluants :

- Les matériaux de construction des appareils associés au réglage d'air primaire et/ou secondaire

Les émissions atmosphériques issues de trois appareils de géométrie commune fabriqués dans trois matériaux différents à savoir la fonte, le réfractaire et la vermiculite ont été comparées. Deux modes de réglage, air primaire seul et air primaire et secondaire combinés ont été testés sur les trois appareils

- L'utilisation d'un catalyseur dans le foyer.

Les émissions atmosphériques issues d'un appareil en fonte fonctionnant en mode réglage air primaire et secondaire combinés avec et sans le catalyseur Vermont Castings ont été comparées.

Chacune des deux techniques primaires étudiées fait l'objet d'un produit de sortie.

3.3.1.2 INFLUENCE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

L'intérêt de ces essais est d'étudier l'influence des matériaux utilisés au sein du foyer sur la nature et les émissions d'imbrûlés. Le premier objectif a été de tester les trois matériaux les plus utilisés dans la fabrication des appareils, c'est à dire l'acier recouvert d'isolant de type vermiculite, la fonte et le réfractaire.

Globalement, la fonte et la brique réfractaire sont des matériaux qui emmagasinent de la chaleur et qui peuvent la restituer ensuite, notamment lors des phases de ralenti. La vermiculite est un matériau plutôt isolant qui peut ainsi limiter les pertes thermiques par les parois. Si ces trois matériaux sont les plus utilisés par les différents fabricants, c'est le plus souvent lié à des habitudes de production et un savoir empirique qu'à des connaissances théoriques. Ces essais ont ainsi eu pour objectifs, à partir d'une conception et d'une géométrie invariante, de quantifier l'influence de la nature des parements intérieurs des appareils.

L'appareil de référence a été choisi dans la gamme des appareils en fonte existants. En effet, la fonte étant un matériau fabriqué avec des moules spécifiques, il n'est pas possible de modifier facilement ces systèmes. Les plans ont donc été utilisés pour fabriquer un premier prototype en acier recouvert de vermiculite et un second en acier recouvert de briques réfractaires. Ces appareils ont été construits sur le même modèle par les trois fabricants partenaires chacun d'entre eux étant spécialisé dans un type de construction.

Ces appareils ont été fabriqués et livrés par les différents partenaires en septembre/octobre 2009. La figure ci-après présente les trois appareils.

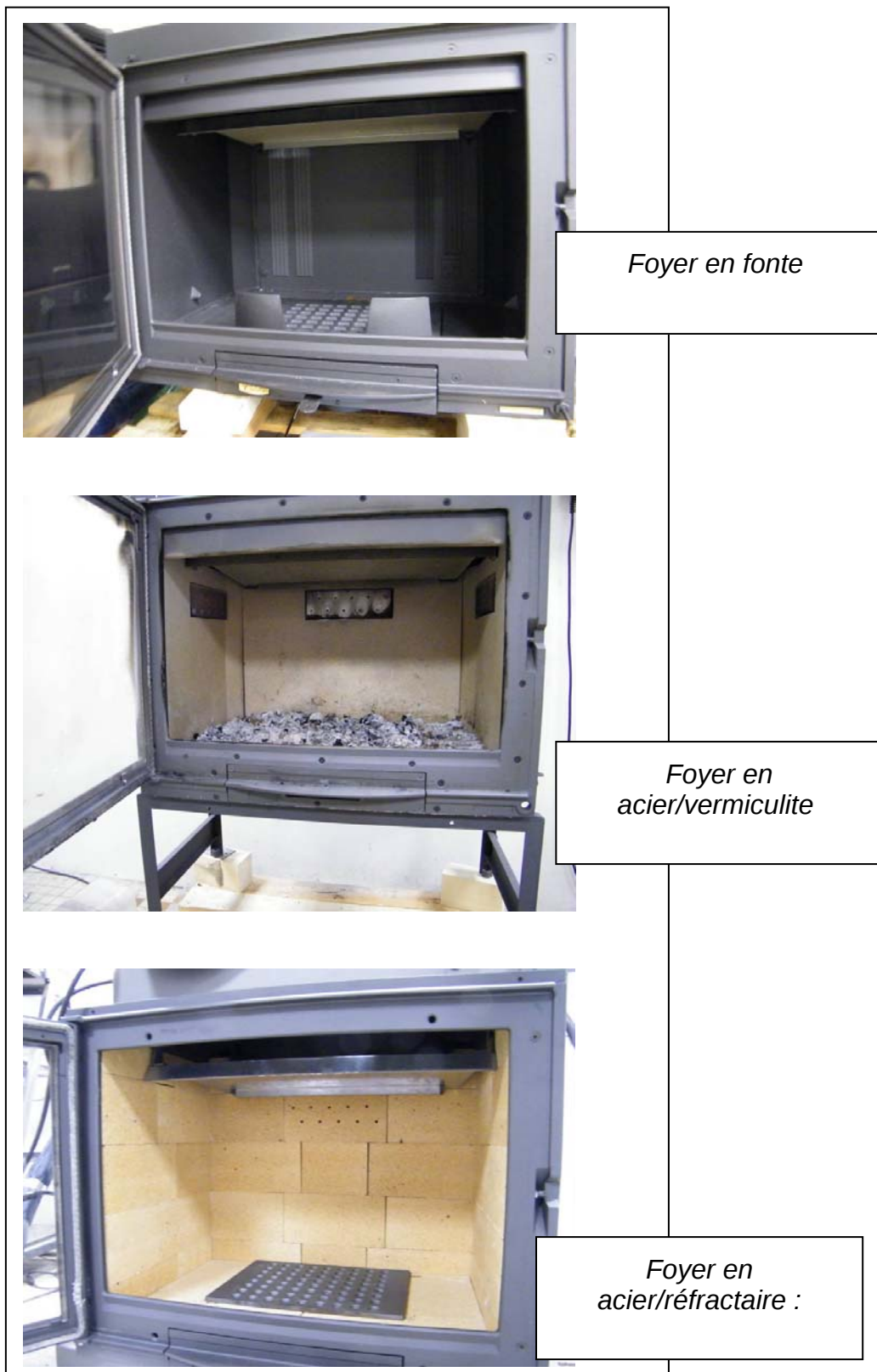


Figure 7 : Appareils testés dans le cadre de l'action 3.1

Ces matériaux ont été testés lors de deux campagnes d'essais :

- L'une avec réglage sur l'air primaire seul sur les trois appareils ;
- L'autre avec réglages sur l'air primaire et l'air secondaire sur les trois appareils.

Lors des essais, les principaux paramètres suivis étaient les suivants :

- performances énergétiques : surtout le rendement ;
- émissions de particules, avec répartition granulométrique ;
- émissions de HAP particulaires et gazeux ;
- contrôle global de combustion : émissions de CO, CO₂, O₂, NO ;
- teneur en lévoglucosan et en carbone récoltés sur filtre : E/C & O/C.

Les essais ont été réalisés suivant les conditions prescrites par la norme NF EN 13229. Les chargements manuels en combustible type bois bûche ont été calculés de manière à garantir une durée d'essai supérieure à 60 minutes. Ces essais ont fait l'objet du produit de sortie « Influences des matériaux et catalyse - choix des matériaux ».

3.3.1.2.1 CARACTERISATION DES EMISSIONS AVEC REGLAGE AIR PRIMAIRE

Dans cette première campagne d'essais, les arrivées d'air secondaire ont été obturées pour réaliser une combustion uniquement en air primaire. Les trois appareils fonte, réfractaire et vermiculite ont été réglés de la même manière pour permettre les comparaisons entre matériaux.

Tableau 8 : Gaz non condensables, COV et rendement énergétique – combustion en air primaire

Type d'appareil	O ₂ (%)	CO à 13 % O ₂ (ppm)	COVT à 13 % O ₂ (ppm)	CH ₄ à 13 % O ₂ (ppm)	Rendement énergétique (%)
Vermiculite	12,2	4 337	565	177	70,7
Fonte	13,6	4 667	590	229	68,3
Réfractaire	14,4	2 918	613	249	62,9

La première série d'essais a abouti aux résultats suivants :

- l'insert vermiculite présente globalement les émissions les plus élevées (HAP, composition en carbone total, émissions de particules en masse) même si le nombre de particules formées lors de la combustion en air primaire est moins important. Ceci montre que les particules formées dans le cas de la combustion avec air primaire en insert vermiculite sont de granulométrie plus importante que pour les inserts réfractaire et fonte.
- l'appareil réfractaire est dans l'ensemble le plus performant dans les conditions de combustion avec air primaire seul.
- l'appareil fonte possède néanmoins des performances assez proches de celles du réfractaire.

3.3.1.2.2 CARACTERISATION DES EMISSIONS AVEC REGLAGES AIR PRIMAIRE ET SECONDAIRE

Dans cette deuxième campagne d'essais, les arrivées d'air primaire et d'air secondaire ont été utilisées. Les trois appareils fonte, réfractaire et vermiculite ont été réglés de la même manière pour permettre les comparaisons entre matériaux.

Tableau 9 : Gaz non condensables, COV et rendement énergétique – combustion en air primaire et secondaire

Type d'appareil	O ₂ (%)	CO à 13 % O ₂ (ppm)	COVT à 13 % O ₂ (ppm)	CH ₄ à 13 % O ₂ (ppm)	Rendement énergétique (%)
Vermiculite	11.5	3 350	-	-	68.3
Fonte	13.9	2 821	293	120	64.8
Réfractaire	14.8	2 461	-	-	59.0

Tableau 10 : Emissions de TSP en masse corrigées à 13 % d'oxygène – combustion en air primaire et secondaire

Type d'appareil	TSP fraction solide à 13 % O ₂ (mg.m ⁻³)	TSP fraction condensable à 13 % O ₂ (mg.m ⁻³)	TSP total à 13 % O ₂ (mg.m ⁻³)
Vermiculite	71	39	110
Fonte	23	53	76
Réfractaire	29	128	157

L'addition d'air secondaire a permis de diminuer les émissions de CO et de COV dans le cas de l'insert fonte mais d'augmenter dans le même temps les émissions de HAP et de particules (toutes méthodes confondues) pour les trois appareils. Dans ce contexte, c'est le système fonte qui présente globalement les meilleures performances.

3.3.1.3 APPAREILS A CATALYSE

L'objectif de l'action 3-2 était d'étudier pour les appareils de combustion domestique utilisant la biomasse l'impact de l'ajout d'un système catalytique sur le fonctionnement de tels appareils. Cette action a fait l'objet du produit de sortie : « Performances environnementales et contraintes d'utilisation de catalyseurs ». Elle a été divisée en cinq étapes :

- Etude bibliographique critique des différentes solutions catalytiques ;
- Tests comparatifs de combustion sur des appareils équipés ou non d'un système catalytique en suivant les polluants tels que CO, COV, HAP, particules, benzène et NOx ;
- Caractérisation des dispositifs catalytiques testés (analyse du pain catalytique avant et après test de combustion) ;
- Recherche de solutions adaptées et proposition de pistes de travail (voir 3.3.3.2) ;

- Présentations des conditions d'utilisations et d'efficacité des différents catalyseurs. Recommandations sur les contraintes d'utilisation de catalyseurs (voir 3.3.3.2).

3.3.1.4 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE CRITIQUE DES DIFFÉRENTES SOLUTIONS CATALYTIQUES

Une liste des différents appareils commercialisés qui fonctionnent avec des dispositifs catalytiques a été établie ainsi qu'une étude bibliographique des solutions catalytiques. Les appareils suivants ont été identifiés suite à cela :

- VERMONT : cette société commercialise des appareils à catalyse depuis de très nombreuses années.
- RUEGG : cette société a déjà commercialisé des appareils à catalyse.
- MORECAT : cette société commercialise un dispositif catalytique indépendant qui peut être placé directement dans un conduit de cheminée à la sortie d'un appareil de combustion.
- Académie du Feu : un certain nombre de dispositifs sont disponibles commercialement via une société partenaire de SUPRA.
- Ce système étant testé dans le cadre d'un autre projet financé par ADEME nommé ReduPoBois, il n'a pas été jugé nécessaire de le tester ici.

Deux filtres catalytiques ont ensuite été sélectionnés :

- le filtre catalytique commercialisé par la société Vermont Castings a été testé en tant que technique primaire c'est-à-dire positionné à la sortie de l'appareil, avant le raccordement au conduit d'évacuation des fumées ;
- le filtre catalytique commercialisé par la société MORECAT en tant que technique secondaire c'est-à-dire positionné dans le conduit d'évacuation des fumées (voir 3.3.2).

3.3.1.5 TESTS COMPARATIFS DE COMBUSTION SUR DES APPAREILS EQUIPES OU NON D'UN SYSTEME CATALYTIQUE.

L'intégralité des résultats obtenus est présentée dans le produit de sortie de l'action 3.2 : « Performances environnementales et contraintes d'utilisation de catalyseurs ».

Caractérisation des émissions avec réglages de l'air primaire et de l'air secondaire sur l'insert fonte avec et sans catalyseur Vermont Castings

Dans cette campagne d'essais, les arrivées d'air primaire et d'air secondaire ont été utilisées, les réglages ayant été légèrement améliorés. Le catalyseur utilisé est de forme cylindrique et de diamètre 150 mm. Il est commercialisé par la société Vermont Castings (USA) et s'intègre directement à la sortie de l'appareil, avant le raccordement au conduit d'évacuation des fumées. Les tests ont été effectués sur l'appareil en fonte.

Tableau 11 : Gaz non condensables, COV et rendement énergétique – intérêt du catalyseur sur insert fonte

Type d'appareil	O ₂ (%)	CO à 13 % O ₂ (ppm)	COVT à 13 % O ₂ (ppm)	CH ₄ à 13 % O ₂ (ppm)	Rendement énergétique (%)
Fonte sans catalyseur	13,9	2 821	293	120	64,8
Fonte avec catalyseur	10,7	356	205	107	72,5

Tableau 12 : Emissions de TSP en masse corrigées à 13 % d'oxygène – intérêt du catalyseur sur insert fonte

Type d'appareil	TSP fraction solide à 13 % O ₂ (mg.m ₀ ⁻³)	TSP fraction condensable à 13 % O ₂ (mg.m ₀ ⁻³)	TSP total à 13 % O ₂ (mg.m ₀ ⁻³)
Fonte sans catalyseur	23	53	76
Fonte avec catalyseur	16	27	43

L'appareil a une action significative sur la réduction des émissions de CO, COV et particules en nombre et en masse (toutes méthodes confondues). Il n'a en revanche pas d'incidence sur les HAP, ni sur la composition en carbone de la fraction solide des particules.

Caractérisation des émissions d'un insert bûches avec et sans catalyseur Ofenkatalysator

Le filtre catalytique Ofenkatalysator a été évalué avec un insert présentant des performances environnementales élevées et donc discriminantes pour son évaluation technique. Tout comme les électrofiltres, le filtre catalytique n'a montré aucune efficacité sur la fraction condensable de l'aérosol. Une efficacité d'épuration de près de 30 % a été observée pour le CO sur les cycles complets de combustion. Le nombre total de particules fines a été réduit de 35 %. Une réduction de l'ordre de 80 %, des émissions d'un grand nombre de HAP a pu être observée. Cette réduction n'est toutefois pas observée sur les HAP oxygénés dosés. Les résultats obtenus pour ce filtre catalytique sont présentés en section 3.3.2.

3.3.2 ETUDE DES TECHNIQUES SECONDAIRES DE TRAITEMENT

3.3.2.1 PRINCIPE ET OBJECTIFS

Quatre techniques d'épuration ont été étudiées en couplage avec cinq appareils de chauffage différents.

Tableau 13 : Couples : appareils de chauffage / dépoussiéreurs évalués lors des campagnes d'essais

Campagne d'essai	Appareil de chauffage	Label flamme verte	Classement CITEPA	Combustible	Dépoussiéreur évalué (Constructeur)
CERIC Novembre 2009	Insert 1 (10 kW) Rendement nominal 74,5%	★★★★	récent	Bûches	Electrofiltre ZUMIKRON (Ruegg)
Plate-forme d'essais CTIF Mars 2010	Poêle (7 kW) Rendement nominal 77,6%	aucun	récent	Bûches	Electrofiltre R_ESP (APP)
	Poêle (5,5 kW) Rendement nominal 90%	★★★★★	performant	Granulés	
Plate-forme d'essais CERIC Juillet 2010	Chaudière (11,6 – 14,5 kW) Rendement nominal	aucun	récente	Bûches	Recyclone (ACS)
Plate-forme d'essais CERIC Janvier 2011	Insert 2 (10 kW) Rendement nominal 71,3%	★★★★	récent	Bûches	Der Ofenkatalysator (MoreCat GmbH)

Pour trois des quatre techniques, l'efficacité d'épuration a été déterminée en réalisant des prélèvements en simultanée en amont et en aval de la technique. Hormis pour la campagne d'essais 4 visant à évaluer l'efficacité d'épuration du Ofenkatalysator (Morecat), pour laquelle les essais « amont » et « aval » n'ont pu être menés simultanément.

Lors des essais, les paramètres suivants ont été suivis :

- La température des fumées dans le conduit aux points de prélèvement ;
- Les émissions de CO, CO₂, NO_x, SO₂ ainsi que la teneur en O₂ (analyseurs de gaz) ;
- Les émissions de COVT, COVNM, CH₄ (analyseur FID) et de BTEX (tubes de charbon actif) ;
- Les émissions TSP pour la fraction particulaire (filtre) et la fraction condensable (barboteurs) ;
- Les émissions de HAP particuliers (filtre), semi-volatils (condensat) et volatils (résine XAD2) ;
- La granulométrie en masse des poussières (impacteur DEKATI).
- La granulométrie en nombre des poussières (ELPI).

Pour la détermination des performances d'épuration, un total de trois à six essais successifs a été réalisé sur chaque paramètre. Les résultats en termes de concentrations émises de ces polluants sont présentés en Annexe II.

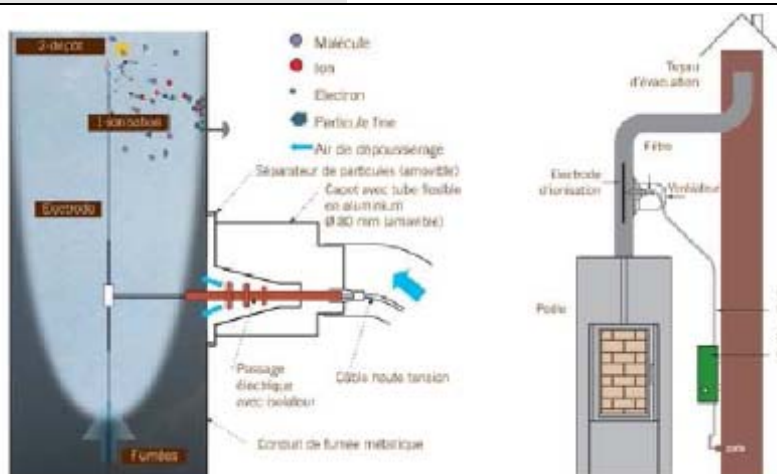
3.3.2.2 PRESENTATION DES FILTRES TESTES

RÜEGG - ZUMIKRON

Le constructeur suisse de poêle Rüegg a développé un petit filtre électrostatique, appelé Zumikron, utilisable pour les applications à petites échelles et les poêles. Il est intégré dans le conduit d'évacuation des fumées. Ce produit est disponible commercialement.

Tableau 14 : Spécifications du Rüegg – Zumikron (source: Rüegg AG)

Constructeur	Rüegg Cheminée AG / Suisse
Nom du produit	Zumik®on
Méthode / technologie	Filtre électrostatique
Etat du développement	Sur le marché
Application	Poêles, chaudières chauffage central
Gamme de puissance	< 35 kW
Efficacité de séparation	57 - 81%
Perte de charge	~0 (accumulation de particules peuvent réduire la section)
Alimentation	réseau AC (230V) ; < 12W
Évacuation des particules	Nettoyage manuel du tube
Divers	
Prix	~ 1200 €
Remarques	Possibilité de recevoir une aide de 500 € de la part de l'institution allemande "BAFA"



Rüegg - Zumik®on (source: Rüegg AG)

MORECAT – DER OFENKATALYSATOR

Ce filtre catalytique est constitué d'un réseau d'acier recouvert d'une substance active. Il est installé dans le conduit et est donc adapté aux inserts et poêles. Il peut être shunté lors de la phase de démarrage en tournant simplement la poignée quand la température des fumées ne permet pas d'atteindre le niveau d'activation de la catalyse et pour éviter les problèmes de pertes de charge en phase de démarrage (visible dans la figure ci-dessous). Il doit être régulièrement nettoyé en le passant sous l'eau courante. Le produit est commercialisé.

Tableau 15 : Spécifications du MoreCat – Der Ofenkatalysator (source: Morecat GmbH)

Constructeur	MoreCat / Allemagne
Nom du produit	Der Ofenkatalysator
Méthode / technologie	Filtre catalytique
Etat du développement	Sur le marché
Application	Poêles, inserts
Gamme de puissance	De 4 à 100 kW selon les modèles, <8 kW pour celui testé (Ø 150 mm)
Efficacité de séparation	Supérieure à 50 %
Perte de charge	Assez importante pour gêner en phase de démarrage
Alimentation	-
Évacuation des particules	Nettoyage manuel de la cartouche à l'eau courante
Divers	Peut ne pas être utilisé lors de la phase de démarrage
Prix	265 € +60 € filtre additionnel intégré (hors TVA et frais de livraison)



Figure 8 : MoreCat – Der Ofenkatalysator (source: Morecat GmbH)

APP - R_ESP : FILTRE ELECTROSTATIQUE HAUT DE CHEMINEE

Applied Plasma Physics AS et Exhausto CDT (Danemark) ont uni leurs efforts pour le développement final du système R_ESP (Residential ElectroStatic Precipitator). Ce système est en phase finale d'essais terrain et n'est pas encore commercialisé. Il s'agit d'un filtre électrostatique qui vient se placer en extrémité du conduit de cheminée. L'entretien (et la régénération du filtre) serait réalisé une fois par an lors du ramonage.

Tableau 16 : Spécifications du R_ESP

Constructeur	Applied Plasma Physics AS
Nom du produit	R_ESP
Méthode / technologie	électro-filtre extrémité de cheminée
Etat du développement	essais terrain
Application	poêles et chaudières à bois
Gamme de puissance	3 – 20 kW
Efficacité de séparation	85 – 99 %
Perte de charge	
Alimentation	~60 W (230 VAC)
Évacuation des particules	Une fois par an par les ramoneurs
Divers	
Prix	Coût cible = ~1000 €
Remarques	

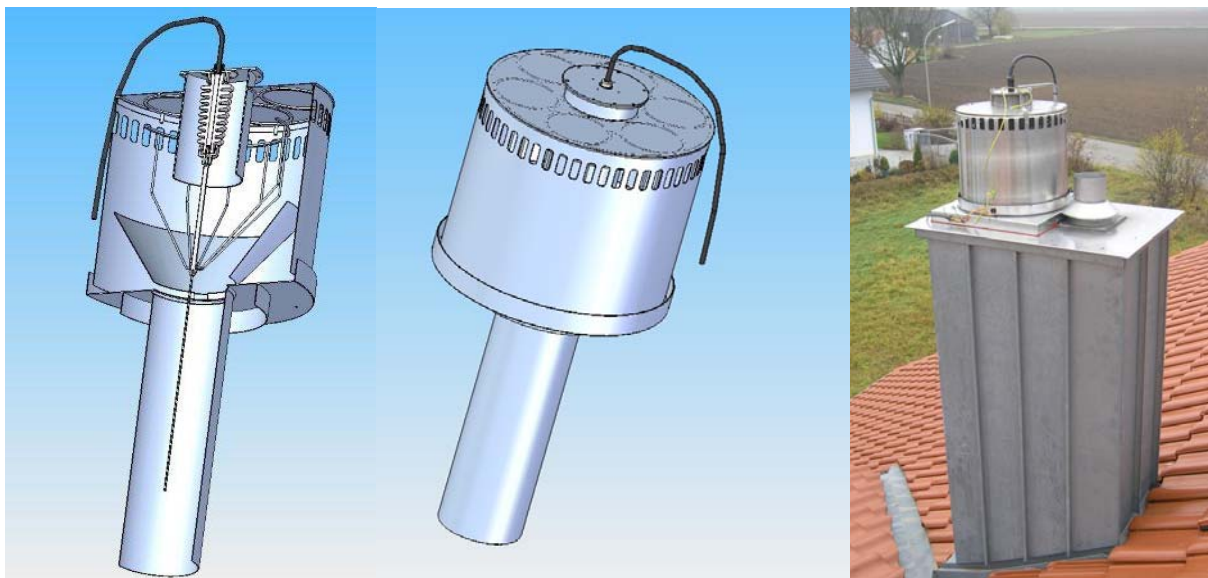


Figure 9: Coupe et vues du R_ESP d'APP (source: APP AS)

ACS- RECYCLONE

La société portugaise Advanced Cyclone Systems propose les systèmes « Hurricane » et « ReCyclone ». Bien que ces systèmes ne soient pour le moment pas du tout appliqués à la combustion du bois domestique, il paraissait intéressant de les évaluer dans ce contexte.

Hurricane est un cyclone à flux inversé optimisé numériquement pour capter de fines particules. En ayant un diamètre de coupure des particules plus bas que ceux des cyclones et multi-cyclones, il atteint des efficacités de filtration beaucoup plus élevées.

Le Hurricane peut être couplé à un système de recirculation pour constituer le ReCyclone, une assistance électrique peut également être intégrée, laquelle permet d'ioniser les particules et d'augmenter ainsi leur taux de recirculation.

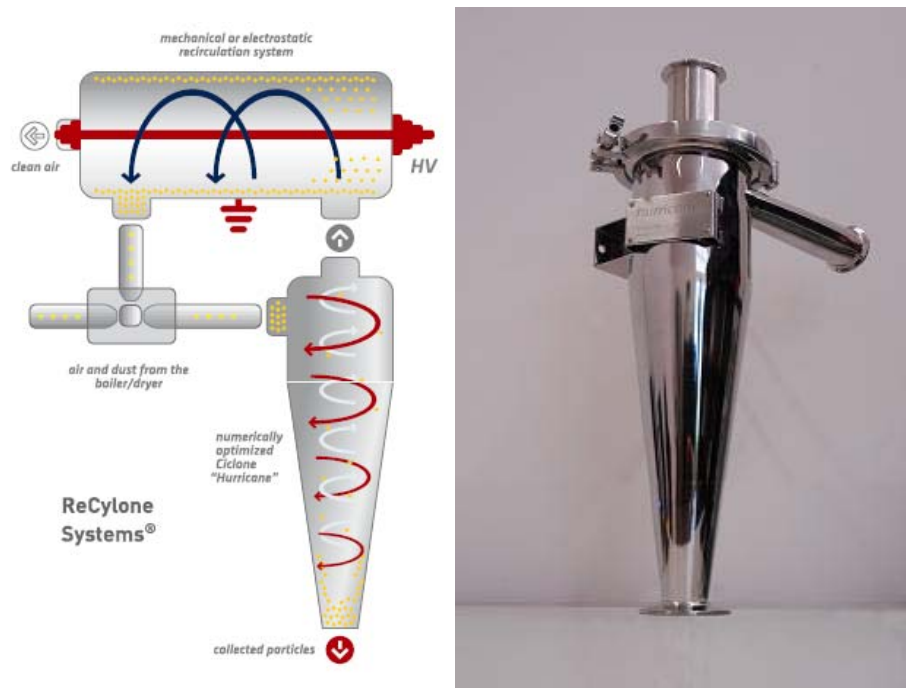


Figure 10 : Principe du ReCyclone avec concentration électrostatique (gauche) et image du hurricane de 80 m³/h (droite) (source: ACSystems)

3.3.2.3 SYNTHÈSE COMPARATIVE DES TECHNIQUES SECONDAIRES DE TRAITEMENT DES FUMÉES ÉVALUÉES

3.3.2.3.1 PERFORMANCES D'ÉPURATION

Les performances moyennes démontrées par chacun des dispositifs d'épuration sont comparées dans la Figure 11 ci-dessous.

On rappelle ici, qu'hormis pour le filtre catalytique, les efficacités moyennes d'épuration ont été déterminées à partir d'essais réalisés simultanément en amont et en aval du dispositif étudié. Dans le cas du filtre catalytique, elles ont été déterminées à partir d'essais réalisés avec et sans le dispositif. Dans le cas du filtre catalytique, elles ont été déterminées à partir d'essais réalisés avec et sans la technique. L'efficacité moyenne a été calculée à partir des résultats obtenus pendant la combustion vive c'est-à-dire en démarrant le mesurage trois minutes après la fermeture de la porte du foyer et en prélevant pendant 30 minutes.

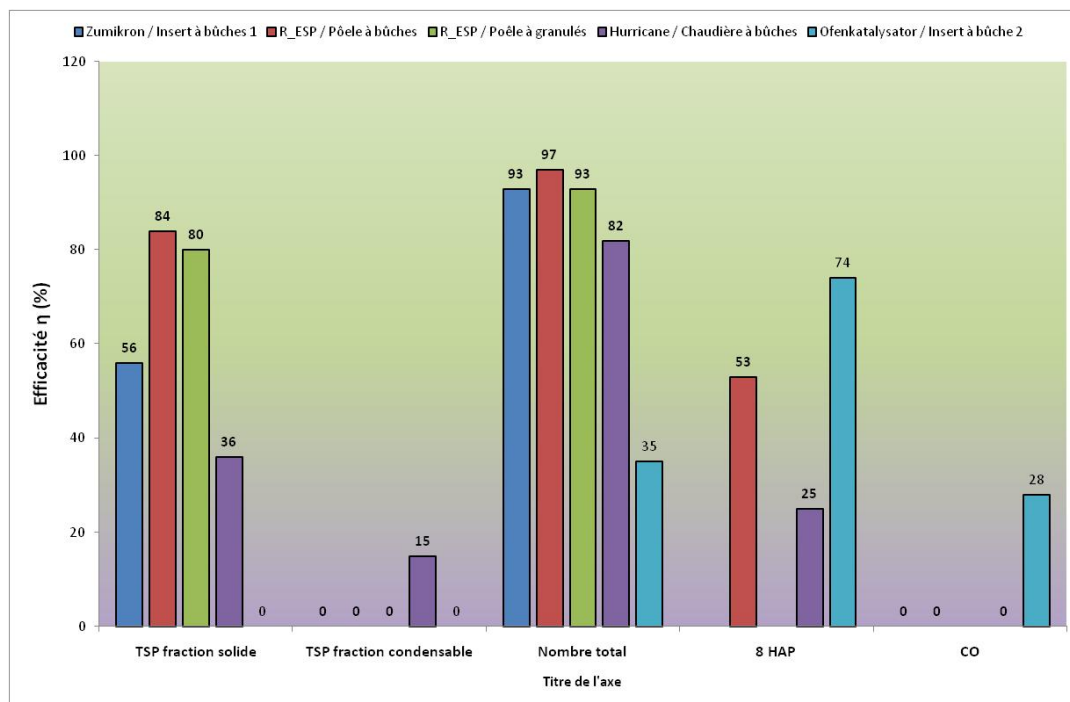


Figure 11 : Performances d'épuration des techniques secondaires évaluées

NB :

- L'absence d'histogramme pour certains paramètres signifie soit que le paramètre n'a pu être mesuré, soit que les résultats ne permettent pas de conclure ;
- Les 0 représentent une efficacité nulle ;
- L'efficacité indiquée pour les HAP correspond à l'efficacité moyenne déterminée sur les 8 HAP mentionnés dans l'arrêté de 2 Février 1998 relatifs aux installations classées;
- L'abattement de 28 % sur le CO pour l'Ofenkatalysator a été observé lors des cycles complets de combustion et non sur la durée des essais.

PERFORMANCES DES ELECTROFILTRÉS

Les électrofiltres n'ont montré aucune efficacité sur la fraction condensable de l'aérosol. L'électrofiltre R_ESP présente les meilleures performances d'épuration sur la fraction solide des TSP (> 80 %) ainsi que sur les particules fines en nombre (> 93 %). Il a de plus deux avantages majeurs par rapport à l'électrofiltre ZUMIKRON :

- son efficacité d'abattement varie peu ou pas selon la granulométrie de l'aérosol ;
- sa position privilégiée en sortie de conduit de cheminée garantit des températures de fumées suffisamment basses pour qu'une épuration significative en masse des HAP les plus lourds soit également observée.

L'électrofiltre ZUMIKRON a démontré une efficacité d'abattement en nombre des particules supérieure à 90 % mais présente des performances de dépoussiérage modérées lorsque l'on considère la concentration massique des particules solides avec une moyenne de 56 % pour les TSP. Un problème d'encrassement rapide du système est également apparu lors des essais d'évaluation puisqu'après 17 essais (55 kg de bois consommés) ; l'électrofiltre était très encrassé et n'offrait plus aucune performance d'épuration. Le balayage d'air assuré par le ventilateur serait donc insuffisant dans le cas d'une utilisation soutenue pour maintenir une efficacité suffisante.

PERFORMANCE DU PROTOTYPE CYCLONE HURRICANE

Le prototype cyclone Hurricane évalué a généré des pertes de charges (probablement dues au fait que les températures de fumées étaient plus faibles que prévues initialement) qui n'ont pas pu être complètement compensées par le ventilateur. Il en a résulté un fonctionnement en conditions dégradées de la chaudière qui s'est traduit par l'émission d'aérosols présentant une contribution importante de particules fines et d'espèces condensables. Il a présenté une efficacité de dépoussiérage sur la fraction solide des TSP n'excédant pas 35 %.

Cependant cette efficacité modérée est à relativiser compte tenu des caractéristiques de l'aérosol mentionnées ci-dessus qui ont pu s'avérer pénalisantes pour son évaluation. Il présente en revanche l'intérêt d'être la seule technique ayant montré une efficacité d'épuration, bien que limitée, sur la fraction condensable de l'aérosol. Une réduction importante (>50%) des émissions de HAP et de particules fines a également été observée. La réduction des émissions de ces trois paramètres (fraction condensable, HAP lourds et particules fines) est probablement associée à l'occurrence de phénomènes de condensation dus aux différences de température entre l'entrée et la sortie du système. Si ces phénomènes de condensation n'étaient pas attendus a priori, ils semblent favoriser la réduction des émissions de polluants gazeux et condensables. Ils peuvent cependant conduire à l'encrassement du cyclone ce qui pourrait perturber son fonctionnement. Il conviendrait donc, afin de rendre ces phénomènes de condensation utiles à la réduction des polluants sans perturber le fonctionnement de l'appareil, d'éviter l'accumulation des condensats dans le cyclone c'est-à-dire en permettant leur évacuation.

PERFORMANCE DU FILTRE CATALYTIQUE OFENKATALYSATOR

Le filtre catalytique Ofenkatalysator a été évalué avec un insert présentant des performances environnementales élevées et donc discriminantes pour son évaluation technique. Tout comme les électrofiltres, le filtre catalytique n'a montré aucune efficacité sur la fraction condensable de l'aérosol. Une efficacité d'épuration de près de 30 % a néanmoins pu être observée pour le CO sur les cycles complets de combustion. Une réduction de l'ordre de 80 %, des émissions d'un grand nombre de HAP a pu être observée. Cette réduction n'est toutefois pas observée sur les HAP oxygénés dosés.

3.3.2.3.2 COMPARAISON AVEC LES DONNEES EXISTANTES

Les résultats obtenus dans le cadre du projet sont comparés ici aux données existantes c'est-à-dire celles collectées dans le cadre de l'action 1 relative au bilan des connaissances sur les techniques de réduction des émissions issues de la combustion domestique du bois, ainsi que des données issues d'un rapport⁽²⁰⁾ publié fin 2011 par un groupe d'experts internationaux dans le cadre des travaux de l'International Energy Agency (IEA) présentant un bilan des connaissances sur l'efficacité des techniques secondaires de réduction des émissions issues de la combustion domestique du bois. En l'absence de données disponibles pour la technologie prototype de cyclone testée, cette comparaison concerne uniquement les électrofiltres et le filtre catalytique.

Tableau 17 : Comparaison des données d'efficacité avec les données existantes

	<u>Der Ofenkatalysator</u>				<u>Zumikron</u>		<u>R ESP</u>	
	<u>CO</u>	<u>Masse fraction solide</u>	<u>COVT</u>	<u>HAP</u>	<u>Nombre</u>	<u>Masse fraction solide</u>	<u>Masse fraction solide</u>	<u>Nombre</u>
Données des tests partenaires	Labo 38%	Labo 12%	Aucune efficacité		Labo (n=3) >=80% Terrain (n=9) 40-75 %	Labo 50-75% Terrain (n=3) 40-60%	Terrain 40-80% (valeurs extrêmes exclues)	
Données littérature	IVD Labo 60% Kuopio labo 87-93%	-	IVD Labo 60% Kuopio labo 80-100% (COVNM) 30-70% CH4	IVD Labo 60% Kuopio labo 20-50%	Terrain (n=12) 25-65%	Rapport IEA 41% (solid fraction n=13) (Austria) 11-17% (n=36, Germany)	Rapport IEA 86% (Suède) 55-69% (n=36, Allemagne)	Rapport IEA 85-99% (Sweden)
Résultats obtenus	28%	Aucune efficacité	Non déterminée	74%	Labo (n=3) 93 %	Labo (n=6) 42-79 %	Labo (n=12) 63-95%	Labo 93-97% (n=3)

3.3.2.3.3 COMPARAISON TECHNIQUE, ECONOMIQUE ET PRATIQUE DES TECHNIQUES SECONDAIRES

L'évaluation comparative des techniques secondaires doit, en plus des performances techniques, prendre en considération les aspects économiques, pratiques et esthétiques afin de déterminer quels sont les systèmes les plus susceptibles de convenir au marché du chauffage domestique au bois.

AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES TECHNIQUES TESTEES

Les tableaux suivants présentent pour chaque technique, les avantages et les inconvénients pouvant être associés aux différents paramètres à prendre en compte.

Tableau 18 : Avantages et inconvénients de l'électrofiltre Zumikron

Electrofiltre ZUMIKRON		
	Avantages	Inconvénients
Efficacité d'épuration	- Haute efficacité d'épuration en nombre ($\eta > 92 \%$)	- Efficacité d'épuration en masse limitée ($\eta \approx 56 \%$) - Efficacité d'épuration dépendante de la granulométrie des particules - Aucune efficacité sur la fraction condensable TSP - Aucune efficacité sur les HAP - Encrassement rapide du système - Sensible aux variations de débit et de concentration en poussières à traiter
Mise en œuvre pratique	- Compatible avec tout type d'appareil combustible de puissance inférieure à 35 kW - Fonctionnement automatique - Pas de pertes de charge, pas d'assistance nécessaire - Possibilité de fonctionnement à des températures élevées (jusqu'à 400 °C) - Etat d'encrassement indiqué par la présence de diodes lumineuses	- Distance à respecter en amont du Zumikron pour limiter les risques de surchauffe - Nécessite de disposer d'1,5 m de conduit métallique en aval du Zumikron - Présence de Haute tension : • Vide réglementaire au niveau de l'installation dans le domestique • Risque électrique : à prendre en compte pour installation et entretien (habilitation des intervenants) • Risque incendie - Nécessite un ramonage de conduit régulier afin d'éviter tout risque d'inflammation ou d'explosion des poussières accumulées et le maintien d'une bonne efficacité
Aspect esthétique	- Directement intégré au conduit de cheminée et donc peu encombrant	- Fonctionnement pouvant être jugé bruyant à cause du ventilateur assurant l'air de balayage
Coût de revient	- Prix d'achat raisonnable : 1200 € - Puissance consommée inférieure à 12 W, soit un coût d'utilisation presque nul ($\approx 0,0014 \text{ €/h}$)	- Frais d'entretien supplémentaires du conduit: ramonage à effectuer un peu plus fréquemment qu'en absence du Zumikron

Tableau 19 : Avantages et inconvénients de l'électrofiltre R_ESP

Electrofiltre R_ESP		
	Avantages	Inconvénients
Efficacité d'épuration	- Haute efficacité d'épuration en nombre ($\eta > 93 \%$) - Haute efficacité d'épuration en masse de la fraction solide TSP ($\eta > 80 \%$) - Efficacité sur les HAP lourds	- Sensible aux variations de débit et de concentration en poussières à traiter - Aucune efficacité sur la fraction condensable TSP
Mise en œuvre pratique	- Compatible avec tout type d'appareil de puissance inférieure à 20 kW - Fonctionnement automatique - Pertes de charge nulles	- Nécessite une alimentation électrique en 220 V 16 A accessible jusque sur le toit - Présence de Haute tension : • Vide réglementaire au niveau de l'installation dans le domestique • Risque électrique : à prendre en compte pour installation et entretien (habilitation des intervenants) - Positionnement sur le toit, à prendre en compte pour installation et entretien (habilitation des intervenants) - Pas de contrôle de l'état d'encrassement - Nécessite un ramonage de conduit régulier afin d'éviter tout risque d'inflammation ou d'explosion des poussières accumulées
Aspect esthétique	- Situé à l'extérieur de la maison, en sortie de cheminée : confort et esthétique intérieurs inchangés	- Production d'étincelles et phénomène de claquage pouvant être jugé bruyant par le voisinage - Design pouvant être jugé inesthétique vu de l'extérieur
Coût de revient	- Prix d'achat raisonnable : 1000-2000 € - Puissance moyenne consommée de l'ordre de 60 W, soit un coût d'utilisation restreint ($\approx 0,0066 \text{ €/h}$)	- Frais d'entretien supplémentaires du conduit: ramonage à effectuer un peu plus fréquemment qu'en absence du R_ESP

Tableau 20 : Avantages et inconvénients du cyclone Hurricane

Cyclone Hurricane		
	Avantages	Inconvénients
Efficacité d'épuration	- Haute efficacité d'épuration en nombre ($\eta \approx 82 \%$) - Efficacité potentielle sur la fraction condensable des TSP	- Efficacité d'épuration modérée sur la fraction solide des TSP ($\eta \approx 36 \%$)*
Mise en œuvre pratique	- Compatible avec tout type d'appareil - Fonctionnement automatique - Poussières récupérées dans un bac de collecte et non accumulées dans le conduit	- Perte de charge importante ($> 300 \text{ Pa}$) : Nécessite la mise en place d'un ventilateur (fonctionnement en tirage forcé) - Mise en pression d'une partie du conduit non conforme avec un usage domestique - Hurricane positionné en dehors du conduit et nécessitant donc d'être raccordé - Difficile à mettre en œuvre - Dimensionnement nécessaire du cyclone
Aspect esthétique	- Aucun	- Esthétique intérieure de la maison modifiée - Hurricane encombrant et pouvant être jugé inesthétique. - Fonctionnement bruyant du ventilateur
Coût de revient	- Absence de frais d'entretien supplémentaires du conduit : fréquence de ramonage inchangée	- Prix d'achat de l'ensemble Hurricane et ventilateur déraisonnable ($> 4000\text{€}$) - Puissance moyenne consommée par le ventilateur de l'ordre de 1000 W, soit un coût d'utilisation élevé ($\approx 0,12 \text{ €/h}$)

*on rappelle ici que les essais ont été effectués dans des conditions défavorables puisque l'aérosol émis par la chaudière présentait une contribution importante de particules ultra-fines et d'espèces condensables

Tableau 21 : Avantages et inconvénients du filtre catalytique Ofenkatalysator

filtre catalytique Ofenkatalysator		
	Avantages	Inconvénients
Efficacité d'épuration	- Efficacité* modérée de conversion du CO en CO₂ - Haute efficacité sur les HAP	- Aucune efficacité d'épuration des particules - Diamètre de la cassette contenant le catalyseur de 13 cm pour un conduit de 15 cm : configuration discriminante pour l'activité du filtre en particulier en cas de pertes de charges importantes
Mise en œuvre pratique	- Compatible avec tout type d'appareil dont la température des fumées en sortie de buse excèdent les 350 °C - Fonctionnement extrêmement simple et ne demandant aucune alimentation électrique - Mise en œuvre très facile	- Incompatible avec les chaudières et poêle à granulés (T° < 350 °C) - Perte de charge pouvant compromettre le fonctionnement en tirage naturel (9, 10) - Filtre fourni dans un élément de conduit de diamètre 150 mm pouvant nécessiter un raccordement supplémentaire en cas de diamètre différent de la buse - Nécessité de basculer le filtre en position by-pass lors des phases d'allumage, Nécessité de régulièrement nettoyer le filtre (fréquence non précisée par le constructeur)
Aspect esthétique	- Directement intégré au conduit de cheminée et donc peu encombrant - Confort et esthétique intérieurs inchangés	Dispositif d'actionnement des positions horizontales et verticales visible
Coût de revient	- Absence de frais d'entretien supplémentaires du conduit : fréquence de ramonage inchangée - Coût d'achat du Ofenkatalysator et sa cartouche supplémentaire faible : ≈ 450 €	- Renouvellement du catalyseur nécessaire, tous les 2 à 5 ans

*à relativiser compte tenu des conditions de combustion discriminantes (niveaux de CO émis très faibles)

EVALUATION COMPARATIVE

L'évaluation comparative des techniques secondaire est basée sur les éléments techniques, économiques, pratiques et esthétiques présentés dans les tableaux 8 à 11. Cette évaluation comparative est synthétisée dans la Figure 26, elle repose sur les critères suivants :

- Performances de réduction ;
- Mise en œuvre pratique chez le particulier (installation et entretien);
- Coût d'installation et d'entretien;
- Esthétique ;
- Potentiel d'amélioration.

PERFORMANCE DE REDUCTION

Pour cette évaluation, les 5 paramètres suivants ont été pris en compte :

- particules fines en nombre ;
- particules totales en masse, fraction solide ;
- particules totales en masse, fraction condensable ;
- HAP ;
- CO.

Puisque les techniques de réduction n'ont pas été testées dans les mêmes conditions de combustion, cette comparaison sera qualitative, c'est-à-dire que l'évaluation ne sera pas directement liée au pourcentage d'efficacité associé à la technique et au paramètre. Des points sont attribués à la technique selon qu'elle permet ou non un abattement du paramètre considéré :

- 2 points si la technique a permis un abattement significatif du paramètre (>50%, pour les groupes de composés ensemble des composés réduits),
- 1 point si celui-ci est partiel.

Le Tableau 22 rassemble l'évaluation comparative des techniques.

Tableau 22 : Evaluation comparative en termes de performance d'épuration

Technique évaluée Paramètre testé	Zumikron	R ESP	Hurricane	Ofenkatalysator
Particules fines en nombre	Réduction significative : 2	Réduction significative : 2	Réduction significative : 1	Réduction partielle : 1
TSP solide	Réduction significative : 2	Réduction significative : 2	Réduction partielle : 1	Aucune réduction : 0
TSP condensable	Aucune réduction : 0	Aucune réduction : 0	Réduction partielle : 1	Aucune réduction : 0
HAP	Aucune réduction : 0	Réduction partielle : 1	Réduction partielle : 1	Réduction significative : 2
CO	Aucune réduction : 0	Aucune réduction : 0	Aucune réduction : 0	Réduction partielle : 1
Evaluation globale	4	5	5	4

MISE EN ŒUVRE

L'évaluation comparative des contraintes de mise en œuvre relative aux techniques secondaires a été réalisée de la manière suivante :

- Un potentiel de 10 est attribué à chaque technique secondaire ;
- Les contraintes spécifiques à la mise en œuvre de chaque technique ont été listées,
- Une valeur de 2 a été affectée aux contraintes jugées « bloquantes » vis-à-vis de la réglementation notamment,
- Une valeur de 1 a été affectée aux contraintes jugées « surmontables »

Le résultat de l'évaluation est présenté dans le Tableau 23.

Tableau 23 : Evaluation comparative en termes de contraintes de mise en œuvre

Technique évaluée	Zumikron	R ESP	Hurricane	Ofenkatalysator
	Distance minimale en amont du Zumikron pour éviter la surchauffe : -1	Alimentation électrique nécessaire jusqu'au toit :- 1	Génération de pertes de charges : • Tirage naturel (9, 10) non réalisable : incompatible avec la législation -2 ; • Mise en pression positive du conduit si utilisation d'un ventilateur pour évacuation des fumées : incompatible avec la législation -2	Génération de pertes de charges : • Tirage naturel (9, 10) non réalisable : incompatible avec la législation -2 ;
	Distance minimale de 1.5 m en aval du Zumikron : -2		Présence hors conduit : raccordement nécessaire au conduit -1	Températures élevées nécessaires : -1
	Encrassement prématuré de l'électrode : -1			Basculement nécessaire en position verticale durant la phase d'allumage (-1)
	Présence de haute tension : • Pas de législation existante :-2 • Risque électrique (habilitations nécessaires) : -1		Dimensionnement du cyclone à faire réaliser -1	Nettoyage régulier nécessaire : -1
	Ramonage (-1): • Augmentation de la fréquence ; • Difficulté ;			
Evaluation globale	10-8=2	10-5=5	10-6=4	10-5=5

COUT D'ACQUISITION ET DE FONCTIONNEMENT

En termes de coût d'installation, on a considéré souhaitable que le prix n'excède pas 1000€. 0,5 point a été retiré pour chaque centaine d'euros de surcoût.

Pour le Zumikron, avec un prix d'achat de 1200 €, le nombre de points affectés est 9. Pour le R_ESP dont le prix d'achat est estimé entre 1000 et 2000 €, le montant de 1500 € a été retenu, la valeur attribuée est donc de 7,5.

Pour le prototype Hurricane avec ventilateur, le coût de ce prototype, à ce jour, est de l'ordre de 4000 €, la valeur lui étant attribuée est donc 0. Pour le filtre catalyseur Ofenkatalysator, il est nécessaire de renouveler la cartouche, dont le prix d'achat est de l'ordre de 450 €, tous les 2 à 5 ans, et qui pourrait nécessiter l'addition d'un ventilateur, 5 points ont été arbitrairement attribués. Ces coûts sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 24 : Coût d'acquisition des techniques testées

Technique de réduction	Cout d'acquisition (€)
Zumikron	1200
R_ESP	1500
Prototype Hurricane	4000
Ofenkatalysator	450 (à renouveler tous les deux à cinq ans)

En termes de coût de fonctionnement, il est nécessaire de tenir compte de l'alimentation électrique des électrodes haute tension utilisées dans les électrofiltres. Le Zumikron présente une très faible consommation électrique, alors qu'elle est plus élevée pour le R_ESP. Il leur a donc été respectivement retiré 0 et 1 point. Le nombre de points affectés à ces deux techniques est donc respectivement de 9 et 6,5.

ESTHETIQUE

En termes d'esthétique, l'évaluation comparative a été réalisée de manière arbitraire. Dix points ont été à la technique Zumikron, qui s'intègre de manière invisible dans le conduit. Pour le R_ESP visible sur le toit et le Ofenkatalyseur, dont le dispositif servant à actionner les positions horizontale et à la verticale est visible, la valeur 8 a été choisie. Enfin pour le cyclone Hurricane qui est positionné en dehors du conduit, la valeur de 5 a été affectée.

POTENTIEL D'AMELIORATION.

L'objectif de cette partie est de prendre en compte dans l'évaluation, les améliorations potentielles identifiées à partir des essais réalisés.

Concernant les électrofiltres, les deux inconvénients majeurs du Zumikron, appareil commercialisé par la société Ruegg et du R_ESP prototype développé par la société APP, sont, d'une part qu'ils ne permettent pas de réduire les émissions d'espèces condensables et d'autre part qu'ils nécessitent l'utilisation d'une électrode fonctionnant à haute tension (installation et maintenance associées). Les essais réalisés n'ont pas permis d'apporter de pistes permettant de palier ces deux problèmes, un potentiel d'amélioration de 2 leur a été néanmoins été attribué, tout en considérant que la réglementation en ce qui concerne la présence d'équipement haute tension dans les habitations ainsi que le savoir-faire en matière de maintenance pourraient évoluer.

Par ailleurs, le cyclone testé est un prototype spécifiquement adapté d'applications industrielles pour être testé dans le cadre du projet ; compte tenu du contexte de la problématique chauffage au bois, seule la version la plus basique du cyclone a été testée.

De plus, le cyclone testé :

- a généré des pertes de charges importantes qu'il a été nécessaire de vaincre par la présence d'un ventilateur, ce qui en l'état n'est pas compatible avec la législation française en vigueur. Il pourrait être nécessaire d'imaginer un système de by-pass visant à palier ce problème. Alternativement, l'utilisation du cyclone avec un appareil de chauffage fonctionnant avec un ventilateur intégré pourrait être à privilégier ;
- était une version prototype, ne disposant que de la fonction la plus simple proposée par le Hurricane dans sa version industrielle. Il pourrait être envisagé d'évaluer les gains potentiels en termes d'épuration associés à la mise en œuvre de la recirculation et/ou du champ électrique, dans la mesure où ces options n'engendrent pas de pertes de charge supplémentaires ; est la seule technique ayant démontré une réduction de la fraction condensable. Cette réduction est due à des phénomènes de condensation intervenus dans le cyclone. A ce jour, il n'existe pas au niveau du cyclone une possibilité d'évacuation des condensats, ce qui peut gêner le fonctionnement du cyclone. Une telle gestion des condensats représenterait un avantage certain pour cette technique, compte tenu du devenir de la fraction condensable dans l'atmosphère et de sa contribution potentielle aux concentrations de particules fines mesurées dans l'air ambiant.

Pour ces raisons, le cyclone testé présente un potentiel d'amélioration important, évalué à 7.

Enfin, le filtre catalytique a vocation à agir chimiquement sur les espèces gazeuses et particulaires présentes dans l'effluent et il ne constitue donc pas en tant que telle une technique de « dépolluissage ».

Le filtre catalytique testé :

- a été évalué avec un insert présentant des performances environnementales élevées et donc discriminantes pour son évaluation technique.
- s'insère en sortie de buse de l'appareil de chauffage, grâce à un conduit de raccordement. Il est conçu pour fonctionner en tirage naturel. Cependant, l'installation de la cassette au sein du conduit de raccordement a conduit à augmenter les pertes de charges et n'a pas permis un tirage naturel avec une dépression de -12 Pa. Il en a résulté une dégradation de la combustion sans l'assistance d'une boucle de dépression régulée, ce qui en l'état n'est pas compatible avec la législation française en vigueur (9, 10).
- est actif pour des températures supérieures à 350°C. En début de combustion, il peut s'avérer difficile d'atteindre ces niveaux de température, ce qui peut conduire, à by-passer ou à chauffer le catalyseur pendant cette période. Or, le fait de by-passer en début de combustion est très pénalisant, puisque que le catalyseur est inactif pendant la période où les émissions sont les plus importantes. L'utilisation d'un chauffage pour le catalyseur augmente le coût d'achat et de fonctionnement de la technique.

L'utilisation du filtre catalytique pourrait donc s'avérer plus pertinente :

- en association avec un appareil de chauffage fonctionnant avec un ventilateur intégré ;
- dans une configuration de type technique primaire, directement intégré à la partie supérieure du foyer de combustion et assisté d'un système de ventilation intégré au foyer. Le problème de pertes de charge ne se poserait alors plus, et le catalyseur pourrait bénéficier de surcroît de températures plus élevées favorables à son bon fonctionnement. Cependant, cette configuration pourrait être liée à une durée de vie du catalyseur diminuée due aux frottements importants des particules et à des températures très élevées. De plus, l'efficacité pourrait être réduite si le catalyseur n'est pas placé correctement dans le flux de fumées.

On notera par ailleurs que de nouveaux filtres catalytiques (21,22) présentant des pertes de charge en fonctionnement de 2 Pa, équipés de by-pass permettant de garantir un tirage naturel (9, 10) en toute circonstance, de by-pass automatiques, etc. viennent d'être commercialisées. Ces techniques semblent prometteuses puisque les évolutions qu'elles proposent répondent favorablement aux problématiques identifiées lors des essais. Il serait néanmoins intéressant de les tester pour vérifier leur efficacité d'épuration. Pour toutes ces raisons, un potentiel d'amélioration de 5 a été attribué au filtre catalytique.

3.3.3 SYNTHÈSE RELATIVE À L'UTILISATION DES TECHNIQUES PRIMAIRES ET SECONDAIRES DE RÉDUCTION

3.3.3.1 INFLUENCE DES MATÉRIAUX ASSOCIÉS AUX RÉGLAGES D'AIR

3.3.3.1.1 PERFORMANCES DE RÉDUCTION

Les principales conclusions pouvant être tirées des essais réalisés sur les techniques primaires sont les suivantes :

- **Concernant les réglages d'air :** leur impact est très important sur la nature des résultats. Il apparaît ainsi que le rendement diminue et que les émissions polluantes augmentent lorsque l'excès d'air est trop fort. Comme il est connu que le trop faible excès d'air crée des émissions d'imbrûlés importantes par manque d'oxygène, l'optimisation des réglages apparaît comme le point clé pour caractériser les performances d'appareils ;
- **Vis-à-vis des matériaux :**
 - o le plus performant est le réfractaire et l'appareil en fonte a des performances très proches et un peu moins dépendantes des conditions d'essai. En revanche, l'appareil recouvert de vermiculite apparaît moins performant dans les conditions de test. Notons cependant que certaines optimisations de géométrie / dimensionnement d'appareils peuvent avoir des impacts importants sur les performances, certains appareils recouverts de vermiculite ayant de meilleures performances que des appareils en fonte ou réfractaire ;
 - o le lien entre les émissions d'imbrûlés (particules, CO, COV, HAP, etc.) est d'autant plus vrai que les performances de l'appareil sont mauvaises. Lorsque l'appareil devient performant, les liens sont plus difficiles à établir.

Ainsi, si l'appareil en réfractaire est globalement le plus performant, ses émissions de particules et HAP peuvent devenir importantes dans certaines conditions, notamment pour un fort excès d'air ;

- o les appareils recouverts de fonte ou de réfractaire ont très certainement de meilleures performances par une meilleure gestion de l'énergie contenue dans le combustible : ainsi, avec ce type de matériaux, l'énergie libérée durant la phase de combustion vive est stockée dans le matériau, puis elle est restituée à la chambre de combustion en fin de combustion et pour la remise en régime du foyer. La température est alors plus homogène durant toute la période de combustion et permet d'obtenir des performances plus intéressantes ;
- **Quant au dispositif catalytique testé** : il a permis une réelle amélioration des émissions en réduisant fortement les émissions d'imbrûlés (CO, COV et particules). Il convient cependant de rappeler ici que le système testé était positionné en sortie de l'appareil de chauffage, c'est à dire dans des conditions de température plutôt élevées et dans des conditions de réglages optimisées et qu'à ce jour peu de données sur sa durée de vie, et sur ses possibilités de régénération sont disponibles.

3.3.3.1.2 CONTRAINTES ECONOMIQUES ET DUREE DE VIE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Le coût de fabrication des appareils peut varier très fortement selon les matériaux de corps de chauffe et de parement utilisés, ainsi que selon la conception. En effet, dans le prix de fabrication d'un appareil, il faut intégrer le coût des outils nécessaires. Pour un appareil tout fonte, les outillages sont très importants car chaque pièce nécessite un outil. La complexité de l'appareil rendra évidemment le nombre d'outils, et donc le prix des investissements, plus élevé.

Par contre, le coût de production (hors investissement) ne dépend plus que du prix de la fonte. Pour les corps de chauffe en acier, les coûts d'outillage sont faibles et ce sont les parements qui deviennent les plus onéreux. En brique ou en fonte, ils nécessitent également un outillage alors que la vermiculite est disponible en panneaux standard simplement découpés. Pour des géométries d'intérieur simples, le prix de revient d'un appareil avec de la vermiculite sera ainsi plus bas qu'avec un intérieur brique ou fonte.

Par contre si la géométrie devient complexe (notamment avec des formes arrondies), la vermiculite nécessite également un outillage coûteux et perd donc son avantage par rapport à la brique ou à la fonte.

Il a été mis en évidence qu'un poêle en vermiculite a une durée de vie plus faible du fait de la fragilité de ce matériau.

3.3.3.2 PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS D'UTILISATION DES CATALYSEURS

L'étude bibliographique sur les différents catalyseurs possibles de même que l'étude sur la caractérisation avant et après tests de catalyseurs existant conduisent aux réflexions suivantes :

- la nature des composés à éliminer par un système catalytique additionnel est très différente allant des suies aux goudrons aux composés volatils et aux gaz toxiques. Chacun de ces composés peut être détruit individuellement et par voie catalytique dans des conditions bien définies, mais aucune condition opératoire ne semble applicable à l'ensemble des composés en particulier si l'on prend en compte les contraintes inhérentes aux appareils de chauffage domestique fonctionnant au bois : température, temps de contact et présence de cendres inorganiques. Il faudrait faire des choix sur la nature des polluants à éliminer en priorité (en fonction des normes en vigueur ou à venir) et sur la manière d'éliminer séparément cendres minérales et polluants organiques.
- les catalyseurs proposés actuellement font tous appel aux métaux précieux : Palladium (Pd) dans le cas des catalyseurs analysés. Le cours de ces métaux est en constante et très forte augmentation du fait de leur utilisation très importante dans la dépollution automobile. L'utilisation de ces métaux engendre donc un surcoût important et la question de l'impact de ce surcoût sur le prix de vente est à prendre en considération. Les résultats présentés en 3.3.1.5 montrent de plus une efficacité limitée des catalyseurs testés.
- ne devrait-on pas privilégier des catalyseurs moins coûteux et plus spécifiques d'un polluant donné en particulier les métaux de transition ? Un catalyseur bon marché tel que le fer déposé sur un support red/ox est selon la littérature efficace pour les gaz : oxydation totale du CO en CO₂ à basse température ; oxydation du méthane à plus haute température. Les aromatiques simples : benzène, toluène sont aussi facilement oxydables. Cependant peu ou pas d'études ont été réalisées en atmosphère avec une matrice complète, en particulier en présence de vapeurs d'eau et en présence de dérivés soufrés. Le soufre provenant de composés de la biomasse, comme les métaux alcalins présents dans les cendres sont des poisons puissants des catalyseurs opérant en oxydation et reformage comme l'ont montré de nombreuses études en gazéification de la biomasse. Il est à noter que ce problème n'est pas spécifique aux éléments de transition car les métaux nobles sont aussi empoisonnés par les dérivés soufrés libérés par la combustion de la biomasse.
- tous les métaux de transition ne sont pas utilisables car certains présentent des risques de toxicité comme le nickel et le cobalt.

- les catalyseurs analysés dans cette étude étaient directement dérivés de l'industrie automobile et en particulier des études sur les catalyseurs de dépollution trois voies métalliques. En effet la substance catalytiquement active est directement liée à l'acier servant de support. Cette solution est attrayante si des systèmes catalytiques peu coûteux y sont greffés. Il conviendrait de démarrer une étude sur un catalyseur greffé directement sur un support acier ayant subi un traitement thermique approprié pour permettre un greffage de la substance catalytiquement active. Le fer en interaction avec un support redox, ou inclus dans une structure active définie telle que la perovskite ou le manganèse impliqué dans la même structure semblent être des pistes intéressantes.
- les essais d'oxydation totale doivent impérativement être réalisés dans des conditions opératoires proches de la réalité (T, composition des effluents gazeux), ce qui nécessite obligatoirement la réalisation d'un prototype (pilote de laboratoire)
- pour être efficaces sur plusieurs polluants, les systèmes catalytiques devront sans doute être chauffés par un dispositif additionnel. La nature de ce chauffage, non abordé dans la littérature, mérite d'être discutée en détail.
- les pertes de charges dues à l'installation du catalyseur et/ou d'un filtre devront être prises en compte dès la conception de l'appareil de chauffage de manière à respecter la législation actuelle ou à venir.

Les essais réalisés conduisent aux recommandations suivantes :

- la localisation du catalyseur à la sortie de l'appareil de chauffage est essentielle : il est nécessaire de garantir une température suffisante qui permette un fonctionnement optimal du catalyseur. Dans le cas des essais réalisés avec le catalyseur monolithe (Vermont Castings), une température minimale de 300°C est atteinte en plaçant le catalyseur à la sortie de l'avaloir, au niveau du raccordement de l'appareil de chauffage au conduit de cheminée ;
- l'efficacité du catalyseur est optimale à partir d'un taux d'oxygène dans les fumées fixé. Dans le cas des essais réalisés avec le catalyseur monolithe, un taux minimal de 4 % d'oxygène est nécessaire ;
- l'existence d'un système de by-pass sur le catalyseur permet de s'affranchir des pertes de charges très importantes au début du cycle de combustion d'une charge dans l'hypothèse où l'appareil de chauffage fonctionne en tirage naturel (9, 10) ;
- l'intégration du catalyseur directement dans le foyer est une solution envisageable mais qui va dans le même temps provoquer une durée de vie du catalyseur diminuée due à l'usure par frottements importants des particules et à des températures très élevées. De plus, l'efficacité peut s'en trouver réduite si le catalyseur n'est pas placé correctement dans le conduit de fumées.

3.3.3.3 SYNTHÈSE DES RESULTATS OBTENUS POUR LES TECHNIQUES SECONDAIRES

Le Tableau 25 rassemble, pour chaque critère, la note globale affectée à chaque technique. La moyenne calculée correspond à la moyenne pondérée des valeurs définies pour chacun des paramètres. Elle est pondérée de la façon suivante :

- Performance de réduction : 4,
- Mise en œuvre : 3,
- Coût : 2,
- Esthétique : 1 ;
- Potentiel d'amélioration : 1.

Tableau 25 : Synthèse de l'évaluation comparative des techniques testées

Technique évaluée Critère	Zumikron	R_ESP	Hurricane	Ofenkatalysator
Efficacité d'épuration	4	5	5	4
Mise en œuvre	2	5	4	5
Coût	9	6,5	0	5
Esthétique	10	8	5	8
Potentiel d'amélioration	2	2	7	5
Moyenne	4,7	5,3	4	4,9

L'évaluation comparative des techniques testées est présentée en Figure 12.

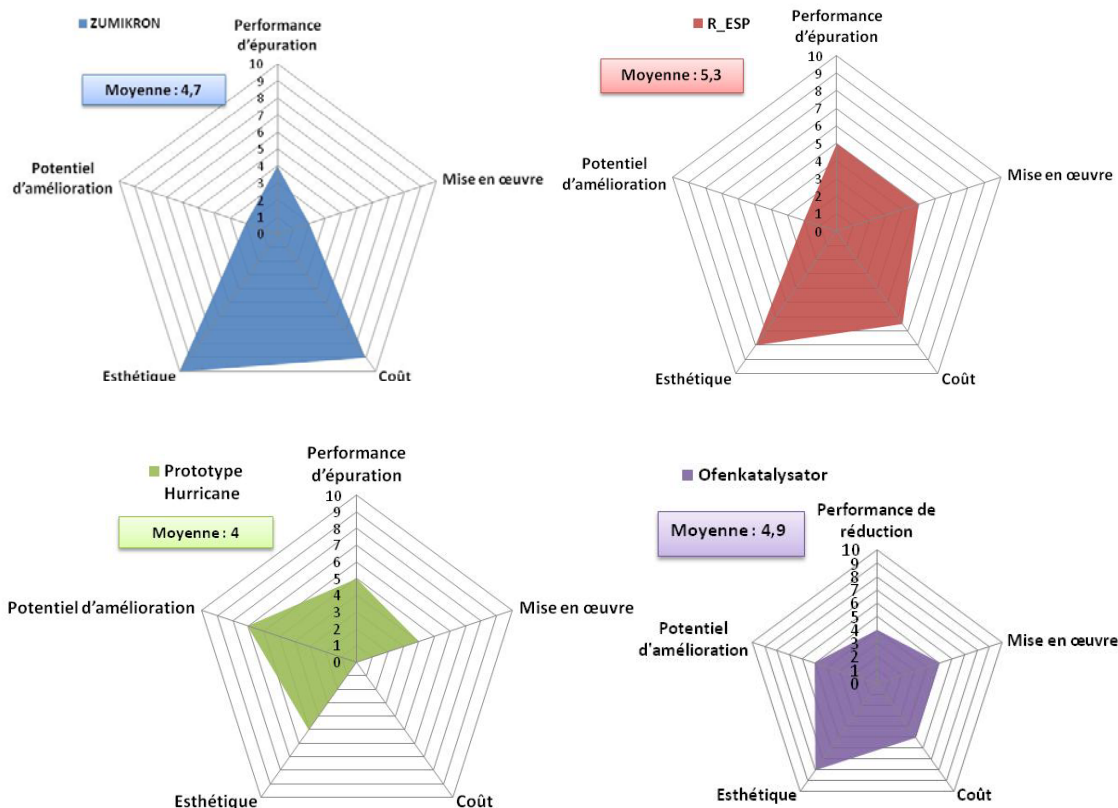


Figure 12 : Comparaison technique, économique et pratique des techniques secondaires évaluées

Parmi les techniques secondaires évaluées, l'électrofiltre R_ESP apparaît à ce jour comme la plus adaptée au secteur du chauffage domestique utilisant la biomasse vis à vis de la réduction des polluants particulaires. D'un point de vue pratique, l'installation d'un électrofiltre présente l'intérêt de générer peu de pertes de charges supplémentaires sous réserve que le conduit et l'électrofiltre soient entretenus et ramonés régulièrement, ce qui n'est pas nécessairement le cas en France.

Cet avantage pratique se traduit également par un avantage économique puisque de ce fait aucun système de ventilation supplémentaire n'est nécessaire, ce qui garantit un coût d'investissement raisonnable. Son intégration directement dans le conduit permet de plus de garder l'esthétique intérieure de la maison inchangée, bien que sa présence au débouché du conduit sur le toit puisse être considérée comme négative du point de vue de l'impact visuel. D'un point de vue technique, l'électrofiltre est un dépoussiéreur et ses performances d'épuration sont donc limitées au domaine particulaire. Il n'a aucune action sur les rejets gazeux, tels que le CO ou les COVT, ni sur la fraction condensable de l'aérosol.

Parmi les deux électrofiltres évalués, le R_ESP se distingue du ZUMIKRON par des performances techniques plus élevées, notamment sur la masse de particules abattues et également sur l'épuration des HAP les plus lourds, majoritairement présents en phase particulaire.

Cependant, le R_ESP, comme tout électrofiltre, présente deux inconvénients majeurs tant sur le plan de la performance de réduction que sur le plan de la mise en œuvre.

En termes de performance de réduction, il ne permet pas de réduire les émissions de la fraction condensable des aérosols, qui contribuent majoritairement aux concentrations de particules fines dans l'air ambiant. En termes de mise en œuvre, la présence de haute tension pose des problèmes relatifs :

- à la législation : pas de législation existant sur le sujet,
- à l'habilitation du personnel susceptible d'installer et d'entretenir une telle technologie,
- au risque incendie accru en raison de la présence de risque d'étincelles dans une zone située à proximité d'un foyer.

En conclusion, si l'électrofiltre R_ESP apparaît, au vu des résultats obtenus, comme la technique secondaire qui présente le plus d'intérêt du point de vue de la réduction des émissions particulaires ; son manque d'efficacité vis-à-vis de la réduction des émissions de la fraction condensable des aérosols d'une part, et la problématique de l'installation, de l'utilisation et de l'entretien de la haute tension dans les logements domestiques d'autre part rendent peu pertinent et difficilement possible le déploiement d'une telle technologie en France, à ce jour.

3.4 FACTEURS D'ÉMISSIONS ET HIERARCHISATION DES PHASES DU PROCESSUS DE COMBUSTION EN TERMES D'ÉMISSION DE POLLUANTS (ACTION 4)

Un facteur d'émission donne la quantité de polluant pour une grandeur caractéristique de l'activité émettrice. Dans le cas de la combustion de bois, cette quantité sera exprimée par kg de bois consommé (c'est-à-dire brûlé) pour les facteurs d'émissions massiques et en MJ d'énergies consommée en ce qui concerne les facteurs d'émissions énergétiques.

Les facteurs d'émissions (FE) ont été calculés à partir des normes en vigueur utilisées pour définir les exigences et les méthodes d'essai relatives aux différents types d'appareils à combustibles solides : NF EN 13229, EN 13240, EN 14785 et NF EN 303-5. Les FE relatifs aux particules (TSP, PM₁₀, PM_{2,5}, et PM₁) ont été obtenus à partir des résultats mesurés sur des essais de combustion de 30 mn ne couvrant principalement que la phase de combustion vive. Les FE relatifs aux HAP et gaz ont été obtenus à partir des résultats mesurés sur des cycles entiers de combustion. Les résultats indiqués pour les HAP correspondent à la concentration totale de ces composés mesurée en phase particulaire et gazeuse. L'annexe I présente les méthodes de mesurage mises en œuvre pour le prélèvement des polluants lors des essais d'évaluation de l'action 4.

3.4.1 SANS SYSTEME DE TRAITEMENT SECONDAIRE DES FUMÉES

Les facteurs d'émissions massiques calculés pour les particules et les composés gazeux sont respectivement reportés dans le Tableau 26 et Tableau 27.

Remarque : On notera ici, qu'afin d'obtenir un résultat comportant un nombre de chiffres compatible avec l'intervalle de confiance (IC) obtenu sur les résultats, la moyenne des résultats a été arrondie. Conformément à la note technique LNHB/04-13 (BNM, Note technique LNHB/04-13, 2004) du bureau national de métrologie, de façon à ce que l'erreur due à l'arrondissement soit inférieure au 1/10 de l'intervalle de confiance, la puissance de 10 d'arrondi a été définie comme étant égale à celle de IC/5.

Tableau 26 : Facteurs d'émissions pour les particules émises par différents types d'appareils de chauffage domestique lors de la combustion vive (moyenne $\pm$ IC 95 %)*ramené à la masse de bois sec

	TSP (fractions solide et condensable) (mg/kg*)	TSP (fraction solide) (mg/kg)	PM ₁₀ (mg/kg)	PM _{2,5} (mg/kg)	PM ₁ (mg/kg*)
Insert à bûches 1	800 $\pm$ 600	250 $\pm$ 150	330 $\pm$ 50	320 $\pm$ 60	310 $\pm$ 50
Insert à bûches 2	830 $\pm$ 227	290 $\pm$ 100	190 $\pm$ 80	190 $\pm$ 80	190 $\pm$ 80
Poêle à bûches, 7 kW,	3200 $\pm$ 1200	1900 $\pm$ 600	970 $\pm$ 180	900 $\pm$ 150	810 $\pm$ 120
Poêle à granulés, 5,5 kW,	1400 $\pm$ 600	800 $\pm$ 300	600 $\pm$ 500	600 $\pm$ 500	500 $\pm$ 400
Chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée	5800 $\pm$ 3300	1100 $\pm$ 800	1080 $\pm$ 280	1040 $\pm$ 280	980 $\pm$ 290

Tableau 27 : Facteurs d'émissions pour les polluants gazeux et HAP émis par différents types d'appareils de chauffage domestique (moyenne $\pm$ IC 95 %)*ramené à la masse de bois sec

	CO (g/kg*)	COVT (mg C/kg)	NOx (mg NO ₂ /kg)	Somme 4 HAP ²³ (µg/kg)	Somme 8 HAP ²⁴ (µg/kg)
Insert à bûches 1	35 $\pm$ 9	3400 $\pm$ 2500	1170 $\pm$ 160	100 $\pm$ 200	500 $\pm$ 900
Insert à bûches 2	7 $\pm$ 9	500 $\pm$ 700	1500 $\pm$ 600	600 $\pm$ 1000	1500 $\pm$ 2000
Poêle à bûches, 7 kW,	46 $\pm$ 23	8400 $\pm$ 4500	1180 $\pm$ 400	11000 $\pm$ 13000	40000 $\pm$ 50000
Poêle à granulés, 5,5 kW,	5 $\pm$ 1	3400 $\pm$ 1200	900 $\pm$ 100	200 $\pm$ 150	900 $\pm$ 600
Chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée	60 $\pm$ 30	9400 $\pm$ 4100	1170 $\pm$ 340	3000 $\pm$ 4000	9000 $\pm$ 11000

Les facteurs d'émissions énergétiques calculés pour les particules et les composés gazeux sont respectivement reportés dans le Tableau 28 et le Tableau 29.

Tableau 28 : Facteurs d'émissions énergétiques pour les particules émises par différents types d'appareils de chauffage domestique (moyenne $\pm$ IC 95 %)

	TSP (fractions solide et condensables (mg/MJ))	TSP (fraction solide) (mg/MJ)	PM ₁₀ (mg/MJ)	PM _{2,5} (mg/MJ)	PM ₁ (mg/MJ)
Insert à bûches 1	48 $\pm$ 39	15 $\pm$ 9	20,3 $\pm$ 3	20,1 $\pm$ 3,4	19,3 $\pm$ 3,1
Insert à bûches 2	52 $\pm$ 14	18 $\pm$ 6	12 $\pm$ 5	12 $\pm$ 5	11,8 $\pm$ 5
Poêle à bûches, 7 kW,	190 $\pm$ 70	116 $\pm$ 38	57 $\pm$ 11	54 $\pm$ 9	49 $\pm$ 7
Poêle à granulés, 5,5 kW,	82 $\pm$ 36	44 $\pm$ 18	37 $\pm$ 20	34 $\pm$ 29	28 $\pm$ 23
Chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée	360 $\pm$ 210	67 $\pm$ 48	67 $\pm$ 18	65 $\pm$ 18	61 $\pm$ 18

Tableau 29 : Facteurs d'émissions énergétiques pour les polluants gazeux et HAP émis par différents types d'appareils de chauffage domestique (moyenne $\pm$ IC 95 %)

	CO (g/MJ)	COVT (mg C/MJ)	NOx (mg NO ₂ /MJ)	Somme 4 HAP (µg/MJ)	Somme 8 HAP (µg/MJ)
Insert à bûches 1	2900 $\pm$ 1100	300 $\pm$ 420	73 $\pm$ 10	6 $\pm$ 12	30 $\pm$ 60
Insert à bûches 2	500 $\pm$ 600	29 $\pm$ 42	99 $\pm$ 32	40 $\pm$ 70	100 $\pm$ 150
Poêle à bûches, 7 kW,	2700 $\pm$ 1400	500 $\pm$ 270	70 $\pm$ 24	700 $\pm$ 800	2500 $\pm$ 3000
Poêle à granulés, 5,5 kW,	299 $\pm$ 48	200 $\pm$ 70	51,3 $\pm$ 3	12 $\pm$ 9	55 $\pm$ 30
Chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée	3500 $\pm$ 1900	590 $\pm$ 260	73 $\pm$ 21	200 $\pm$ 300	600 $\pm$ 700

3.4.2 AVEC SYSTEME DE TRAITEMENT SECONDAIRE DES FUMÉES

Les facteurs d'émissions exprimés en 3.4.1 ont été recalculés avec l'hypothèse de mise en œuvre de deux techniques de traitements de fumées, l'électrofiltre R_ESP et le filtre catalytique Ofenkatalysator. Les facteurs d'émission après abattement ont été calculés en multipliant les facteurs d'émissions bruts par le coefficient $(100 - E_j)$ où E_j représente l'efficacité d'abattement de la technique de traitement pour le polluant j .

Le R_ESP a présenté lors des essais d'évaluation, les performances d'épuration suivantes :

- TSP (fraction solide) : abattement moyen en masse de 82 %
- somme 8 HAP : 56 % et somme 4 HAP : 86 %

Le filtre catalytique Ofenkatalysator a présenté lors des essais d'évaluation, les performances d'épuration suivantes :

- TSP (fraction solide) : abattement moyen en masse de 38 %
- somme 8 HAP : abattement moyen en masse 75 % ;
- CO : abattement moyen sur cycle entier 28%

Ces résultats sont développés dans le rapport d'étude référence INERIS- DRC-11-96869-08631A afférent aux performances des techniques de réduction secondaire. Les facteurs d'émissions après abattement ont été calculés sur la base des hypothèses suivantes :

- performances d'abattement en masse des TSP (fraction solide) indépendantes de la granulométrie de l'aérosol, du flux massique de fumées à traiter, et donc du type d'appareil utilisé ;
- performances d'abattement en masse des HAP similaires à celle observée lors des essais d'évaluation de l'action 4 ;
- performances de dépoussiérage stables dans le temps.

Tableau 30 : Facteurs d'émissions massiques pour les particules émises par différents types d'appareils de chauffage domestique fonctionnant avec l'électrofiltre R_ESP (moyenne $\pm$ IC 95%)

	TSP (fractions solide et condensables (mg/kg))	fraction solide seule (mg/kg)	PM ₁₀ (mg/kg)	PM _{2,5} (mg/kg)	PM ₁ (mg/kg)
Insert à bûches 1	600 $\pm$ 450	50 $\pm$ 30	60 $\pm$ 9	60 $\pm$ 11	60 $\pm$ 10
Insert à bûches 2	500 $\pm$ 100	90 $\pm$ 40	30 $\pm$ 15	30 $\pm$ 15	30 $\pm$ 15
Poêle à bûches, 7 kW,	1400 $\pm$ 450	400 $\pm$ 200	180 $\pm$ 40	160 $\pm$ 40	140 $\pm$ 20
Poêle à granulés, 5,5 kW,	750 $\pm$ 300	140 $\pm$ 50	110 $\pm$ 90	110 $\pm$ 90	110 $\pm$ 70
Chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée	5000 $\pm$ 3000	200 $\pm$ 150	180 $\pm$ 50	180 $\pm$ 50	180 $\pm$ 50

Tableau 31 : Facteurs d'émissions énergétiques pour les particules émises par différents types d'appareils de chauffage domestique fonctionnant avec l'électrofiltre R_ESP (moyenne $\pm$ IC 95%)

	TSP (fractions solide et condensables (mg/MJ))	fraction solide seule (mg/MJ)	PM ₁₀ (mg/MJ)	PM _{2,5} (mg/MJ)	PM ₁ (mg/MJ)
Insert à bûches 1	40 $\pm$ 30	3 $\pm$ 2	3,6 $\pm$ 0,5	3,6 $\pm$ 0,5	3,4 $\pm$ 0,5
Insert à bûches 2	35 $\pm$ 6	5 $\pm$ 2	2,2 $\pm$ 0,9	2,2 $\pm$ 0,9	2,2 $\pm$ 0,9
Poêle à bûches, 7 kW,	90 $\pm$ 30	22 $\pm$ 7	16 $\pm$ 2	16 $\pm$ 2	14 $\pm$ 2
Poêle à granulés, 5,5 kW,	50 $\pm$ 25	7 $\pm$ 4	7 $\pm$ 5	5 $\pm$ 5	5 $\pm$ 4
Chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée	250 $\pm$ 150	13 $\pm$ 9	13 $\pm$ 4	11 $\pm$ 4	11 $\pm$ 4

Tableau 32 : Facteurs d'émissions massiques pour les polluants gazeux et HAP émis par différents types d'appareils de chauffage domestique fonctionnant avec l'électrofiltre R_ESP (moyenne $\pm$ IC 95%)

	CO (g/kg)	COVT (mg C/kg)	NOx (mg NO ₂ /kg)	Somme 4 HAP (µg/kg)	Somme 8 HAP (µg/kg)
Insert à bûches 1	35 $\pm$ 9	3400 $\pm$ 2500	1200 $\pm$ 160	15 $\pm$ 30	200 $\pm$ 400
Insert à bûches 2	7 $\pm$ 9	500 $\pm$ 700	1600 $\pm$ 600	80 $\pm$ 150	700 $\pm$ 900
Poêle à bûches, 7 kW,	50 $\pm$ 20	8000 $\pm$ 6000	1200 $\pm$ 400	1500 $\pm$ 2000	20000 $\pm$ 20000
Poêle à granulés, 5,5 kW,	5.2 $\pm$ 0.8	3000 $\pm$ 1000	880 $\pm$ 50	30 $\pm$ 20	400 $\pm$ 300
Chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée	60 $\pm$ 30	9000 $\pm$ 4000	1200 $\pm$ 300	400 $\pm$ 600	3500 $\pm$ 5000

Tableau 33 : Facteurs d'émissions énergétiques pour les polluants gazeux et HAP émis par différents types d'appareils de chauffage domestique fonctionnant avec l'électrofiltre R_ESP (moyenne $\pm$ IC 95%)

	CO (mg/MJ)	COVT (mg C/MJ)	NOx (mg NO ₂ /MJ)	Somme 4 HAP (μg/MJ)	Somme 8 HAP (μg/MJ)
Insert à bûches 1	3000 $\pm$ 1000	200 $\pm$ 150	70 $\pm$ 10	1 $\pm$ 2	15 $\pm$ 30
Insert à bûches 2	500 $\pm$ 600	30 $\pm$ 40	100 $\pm$ 30	6 $\pm$ 10	40 $\pm$ 70
Poêle à bûches, 7 kW,	3000 $\pm$ 1000	500 $\pm$ 300	70 $\pm$ 20	100 $\pm$ 100	1000 $\pm$ 1500
Poêle à granulés, 5,5 kW,	300 $\pm$ 50	200 $\pm$ 70	51 $\pm$ 3	2 $\pm$ 1	25 $\pm$ 10
Chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée	3000 $\pm$ 2000	600 $\pm$ 300	70 $\pm$ 20	30 $\pm$ 40	300 $\pm$ 300

Tableau 34 : Facteurs d'émissions massiques pour les particules émises par différents types d'appareils de chauffage domestique fonctionnant avec le filtre catalytique Ofenkatalysator (moyenne $\pm$ IC 95%)

	TSP (fractions solide et condensable (mg/kg))	fraction solide seule (mg/kg)	PM ₁₀ (mg/kg)	PM _{2,5} (mg/kg)	PM ₁ (mg/kg)
Insert à bûches 1	600 $\pm$ 450	250 $\pm$ 150	330 $\pm$ 50	320 $\pm$ 60	310 $\pm$ 50
Insert à bûches 2	500 $\pm$ 100	290 $\pm$ 100	190 $\pm$ 80	190 $\pm$ 80	190 $\pm$ 80
Poêle à bûches, 7 kW,	1400 $\pm$ 450	1900 $\pm$ 600	970 $\pm$ 180	900 $\pm$ 150	810 $\pm$ 120
Poêle à granulés, 5,5 kW,	750 $\pm$ 300	800 $\pm$ 300	600 $\pm$ 500	600 $\pm$ 500	500 $\pm$ 400
Chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée	5000 $\pm$ 3000	1100 $\pm$ 800	1080 $\pm$ 280	1040 $\pm$ 280	980 $\pm$ 290

Tableau 35 : Facteurs d'émissions énergétiques pour les particules émises par différents types d'appareils de chauffage domestique fonctionnant avec le filtre catalytique Ofenkatalysator (moyenne $\pm$ IC 95%)

	TSP (fractions solide et condensables (mg/MJ))	fraction solide seule (mg/MJ)	PM ₁₀ (mg/MJ)	PM _{2,5} (mg/MJ)	PM ₁ (mg/MJ)
Insert à bûches 1	40 $\pm$ 30	15 $\pm$ 9	20,3 $\pm$ 3	20,1 $\pm$ 3,4	19,3 $\pm$ 3,1
Insert à bûches 2	35 $\pm$ 6	18 $\pm$ 6	12 $\pm$ 5	12 $\pm$ 5	11,8 $\pm$ 5
Poêle à bûches, 7 kW,	90 $\pm$ 30	116 $\pm$ 38	57 $\pm$ 11	54 $\pm$ 9	49 $\pm$ 7
Poêle à granulés, 5,5 kW,	50 $\pm$ 25	44 $\pm$ 18	37 $\pm$ 20	34 $\pm$ 29	28 $\pm$ 23
Chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée	250 $\pm$ 150	67 $\pm$ 48	67 $\pm$ 18	65 $\pm$ 18	61 $\pm$ 18

Tableau 36 : Facteurs d'émissions massiques pour les polluants gazeux et HAP émis par différents types d'appareils de chauffage domestique fonctionnant avec le filtre catalytique Ofenkatalysator (moyenne $\pm$ IC 95%)

	CO (g/kg)	COVT (mg C/kg)*	NOx (mg NO ₂ /kg)	Somme 8 HAP (μg/kg)
Insert à bûches 1	25 $\pm$ 7	-	1170 $\pm$ 160	125 $\pm$ 225
Insert à bûches 2	5 $\pm$ 7	-	1500 $\pm$ 600	375 $\pm$ 500
Poêle à bûches, 7 kW,	33 $\pm$ 17	-	1180 $\pm$ 400	10000 $\pm$ 12500
Poêle à granulés, 5,5 kW,	3,7 $\pm$ 0,6	-	900 $\pm$ 100	225 $\pm$ 150
Chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée	40,1 $\pm$ 22,3	-	1170 $\pm$ 340	1750 $\pm$ 2750

*l'efficacité du filtre catalytique sur les émissions de COV n'a pas pu être déterminée

Tableau 37 : Facteurs d'émissions énergétiques pour les polluants gazeux et HAP émis par différents types d'appareils de chauffage domestique fonctionnant avec le filtre catalytique Ofenkatalysator (moyenne $\pm$ IC 95%)

	CO (mg/MJ)	COVT (mg C/MJ)	NOx (mg NO ₂ /MJ)	Somme 8 HAP (μg/MJ)
Insert à bûches 1	2100 $\pm$ 800	-	73 $\pm$ 10	7,5 $\pm$ 15
Insert à bûches 2	300 $\pm$ 400	-	99 $\pm$ 32	25 $\pm$ 35
Poêle à bûches, 7 kW,	1900 $\pm$ 1000	-	70 $\pm$ 24	500 $\pm$ 750
Poêle à granulés, 5,5 kW,	215 $\pm$ 35	-	51,3 $\pm$ 3	14 $\pm$ 7,5
Chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée	2500 $\pm$ 1400	-	73 $\pm$ 21	150 $\pm$ 175

3.4.2.1 HIERARCHISATION DES EMISSIONS DE POLLUANTS GAZEUX DES APPAREILS DE CHAUFFAGE DOMESTIQUES

Hormis le poêle à granulés pour lequel la qualité du processus de combustion est constante dans le temps, les appareils de chauffages utilisés présentent tous une phase de combustion homogène (dite également combustion vive ou stable) et une phase de combustion hétérogène (allumage et régime de braises).

La phase de combustion homogène survient lorsque le combustible est chauffé à une température suffisamment importante (> 300 °C) et correspond à la période où les gaz libérés s'enflamment. Lors de cette phase, le processus de combustion est maîtrisé, les émissions sont stables et minimales.

La phase de combustion hétérogène survient lorsque la température dans le foyer est particulièrement basse (ignition du bois et régime de braise en fin de cycle) et constitue la phase de combustion la plus émissive en termes de polluants gazeux (CO, COVT, NOx) et particulaires.

Pour les deux inserts, le poêle à bûches et la chaudière utilisés, la phase de combustion hétérogène lors de l'allumage a été systématiquement observée, et ceci quel que soit le polluant gazeux considéré. L'augmentation des facteurs d'émission lors de la phase d'allumage est variable selon les composés gazeux et selon l'appareil utilisé :

- Pour le CO, les facteurs d'émissions ont été multipliés par un facteur allant de 1,5 (chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée) à 5 (insert à bûche 2) par rapport au régime de combustion vive ;
- Pour les COVT, les facteurs d'émissions ont été multipliés par un facteur allant de 2 (chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée) à 10 (insert à bûche 2) par rapport au régime de combustion vive;
- Pour les NOx, les facteurs d'émissions ont été multipliés par un facteur allant de 1,2 (chaudière à bûches, fonctionnement à allure dégradée) à 2,5 (insert à bûche 1) par rapport au régime de combustion vive.

En revanche, l'augmentation des facteurs d'émissions des polluants en régime de braises n'a pas été systématique pour les NOx, le CO et les COVT. Notons que le fonctionnement de la chaudière à bûches, en allure dégradée (la dépression n'a pu être maintenue à -12 Pa pendant les essais) est responsable de facteurs d'émissions déjà très importants pour le régime de combustion vive et gêne donc la hiérarchisation des émissions.

Le régime de braises, selon les appareils, entraîne une augmentation des facteurs d'émissions pour le CO variant entre 1,1 (poêle à bûches) et 14 (insert à bûches 2) et pour les COVT variant entre 1,2 (chaudière à bûches) et 7 (insert à bûches 2).

3.4.2.1.1 PARTICULES (TSP)

Le suivi en continu de la concentration en nombre des particules par un mesurage ELPI permet également d'identifier les phases de combustion les plus émissives de particules. Le suivi temporel de la concentration total en nombre de particules ainsi que la distribution granulométrique de l'aérosol selon les régimes de combustion homogène et hétérogène sont présentées dans le produit de sortie de l'action 4 relatif à l'étude des facteurs d'émission (§ 1).

L'étude des variations de la concentration en nombre de particules indique que pour l'insert à bûches 1, le poêle à bûches et la chaudière à bûches, seul un pic d'émission est observé en phase d'allumage. Le régime de fin de braises ne présente pas ou peu d'augmentation du nombre de particules émis.

De plus la distribution granulométrique ne varie que très peu entre le régime d'allumage et le régime de combustion établi. Il a parfois pu être observé pour la phase d'allumage (pour les pics d'émission les plus importants) un léger décalage de la distribution granulométrique vers les particules les plus fines en comparaison de la phase de combustion homogène. Il a donc été considéré que les rapports entre les facteurs d'émissions de particules en nombre pour les phases homogènes et hétérogènes sont identiques à ceux observés pour les particules en masse (sans distinction de taille). La hiérarchie des facteurs d'émissions pour les TSP (en masse) a donc été établie approximativement par cette méthode de calcul. Les facteurs d'émissions sont présentés dans les figures ci-après.

Remarque : les facteurs d'émissions pour les TSP calculés au § 3.1 ont été établis sur des essais de 30 minutes, démarrant 3 minutes après introduction de la charge de bois, et ont donc été majoritairement calculés sur la phase de combustion homogène. Ils serviront donc de référence pour les facteurs d'émissions à régime établi.

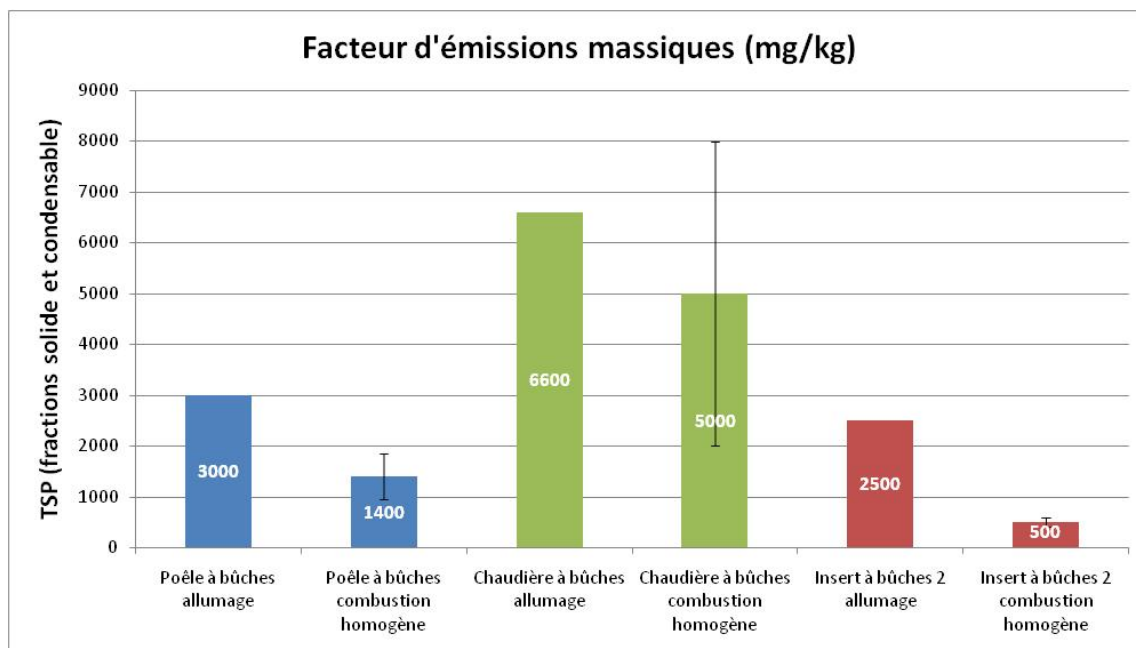


Figure 13 : Facteurs d'émission massiques pour les TSP, hiérarchisés selon les phases de combustion et les appareils de chauffage utilisés

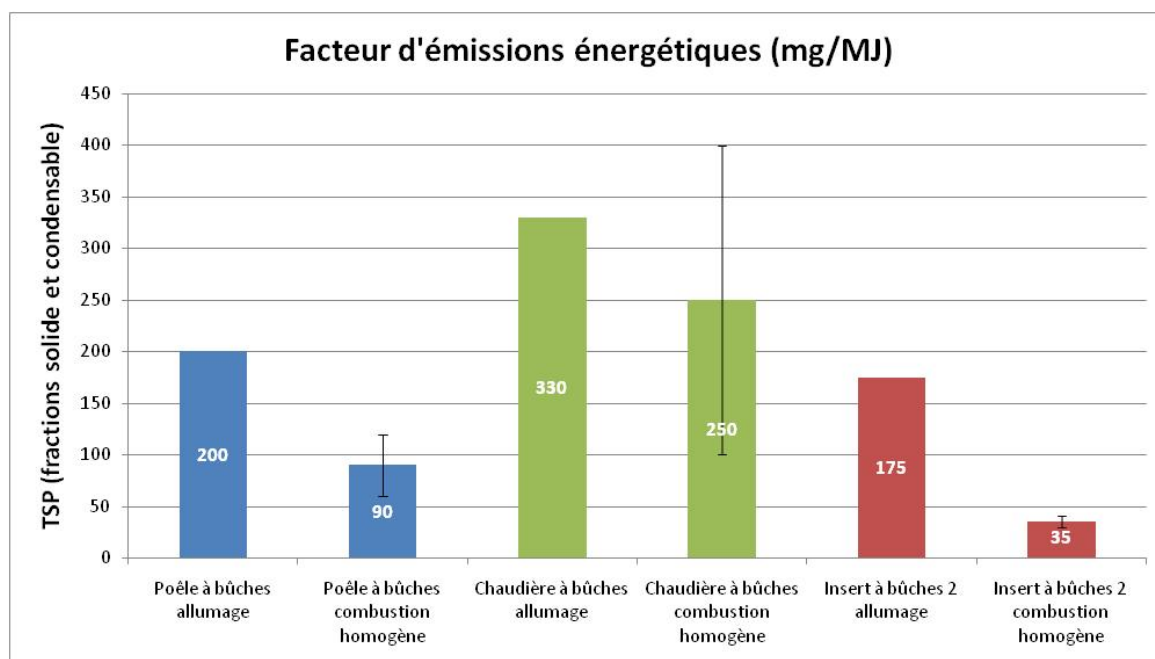


Figure 14 : Facteurs d'émission énergétiques pour les TSP, hiérarchisés selon les phases de combustion et les appareils de chauffage utilisés

En ce qui concerne le poêle à granulés, à l'instar des polluants gazeux, aucun pic d'émission n'est observé et une phase de combustion homogène prédomine pour l'ensemble du cycle de combustion.

3.4.2.2 COMPARAISON DES FACTEURS D'EMISSION DETERMINES AVEC CEUX COLLECTES DANS LE CADRE DE L'ACTION 1

Cette partie a pour objectif de comparer les facteurs d'émission déterminés ici à ceux initialement présentés par le CITEPA dans le produit de sortie de l'action 1 : « Synthèse des émissions de la combustion du bois ».

Il s'agit pour chaque appareil de comparer les facteurs d'émission des paramètres, à :

- ceux des résultats de tests collectés par le CITEPA dans l'action 1 ;
- ceux utilisés dans les inventaires du CITEPA.

On rappelle ici que, compte tenu de leurs caractéristiques (année de commercialisation, rendement énergétique), les appareils testés sont classés au titre des critères du CITEPA de la manière suivante :

- Insert à bûches 1 et 2 : inserts récents ;
- Poêle à bûches : poêle récent ;
- Poêle à granulés : poêle performant ;
- Chaudière à bûches : chaudière récente.

Pour les poêles et les chaudières, les facteurs d'émissions utilisés par le CITEPA sont génériques par type d'appareils c'est-à-dire qu'ils ne sont pas différenciés en fonction du combustible utilisés. Ceci peut être la source d'écarts dans les comparaisons puisque la nature du combustible est un paramètre d'influence très important sur les valeurs de facteurs d'émissions des appareils.

3.4.2.2.1 COMPARAISON DES FACTEURS D'EMISSIONS GLOBAUX

Le Tableau 38 présente l'ensemble des facteurs d'émissions faisant l'objet d'une comparaison dans cette partie. Les polluants pris en compte sont :

- la fraction solide des particules totales déterminée selon la méthode DIN+, c'est-à-dire sur filtre chauffé seul ;
- les 8 HAP du protocole de l'arrêté de 98, déterminés sur fraction solide et condensable de l'aérosol ;
- les COVT exprimés en équivalent carbone ;
- le CO.

Tableau 38 : Comparaison des facteurs d'émissions
(n correspond au nombre d'essais réalisés)

Appareil	Insert bûches 1	Insert bûches 2	Poêle bûches	Poêle granulés	Chaudière bûches
TSP fraction solide					
FE TSP fraction solide (mesures sur filtre seul) déterminé dans action 4 (mg/MJ)	15 ± 9 (n*=6)	18 ± 6 (n=6)	116 ± 38 (n=6)	44 ± 18 (n=5)	67 ± 48 (n=3)
Moyenne FE TSP fraction solide (mesures sur filtre seul) action 1 (mg/MJ)	66 ± 28 (n=7)	66 ± 28 (n=7)	350 ± 393 (n=13)	350 ± 393 (n=13)	27 ± 33 (n=9)

Appareil	Insert bûches 1	Insert bûches 2	Poêle bûches	Poêle granulés	Chaudière bûches
FE Inventaire CITEPA fraction solide (mesures sur filtre seul)(mg/MJ)	Récent 260,0	Récent 260,0	Récent 260,0	Performant 140	Récente 50
8 HAP					
FE 8 HAP déterminé dans action 4 (mg/GJ)	30 ± 60 (n=6)	100 ± 150 (n=5)	2500 ± 3000 (n=5)	55 ± 30 (n=4)	600 ± 700 (n=6)
Moyenne FE 8 HAP fraction solide action 1 (mg/GJ)	157 (n=1)	157 (n=1)	369 ± 500 (n=2)	369 ± 500 (n=2)	-
FE Inventaire CITEPA 8 HAP (mg/GJ)	Récent 83,2	Récent 83,2	Récent 223.6	Performant 120,4	Performant 22,0
COVT					
FE COVT déterminé dans action 4 (mg C/MJ)	300 ± 420	29 ± 42	500 ± 270	200 ± 70	590 ± 260
Moyenne FE COVT action 1 (mg éqC/MJ)	452 ± 262 (n=9)	452 ± 262 (n=9)	85,9 ± 175,2 (n=6)	85,9 ± 175,2 (n=6)	5,5 ± 11,8 (n=6)
FE Inventaire CITEPA COVT (mg éqC/MJ)	Récent 530	Récent 530	Récent 530	Performant 270	Récente 400
CO					
FE CO déterminé dans action 4	2900 ± 1100	500 ± 600	2700 ± 1400	299 ± 48	3500 ± 1900
Moyenne FE CO action 1 (mg/MJ)	3539 ± 3230 (n=34)	3539 ± 3230 (n=34)	2386 ± 1902 (n=24)	2386 ± 1902 (n=24)	555 ± 1118(n=18)
FE Inventaire CITEPA CO (mg/MJ)	Récent 3200	Récent 3200	Récent 4000	Performant 2500	Récente 1000

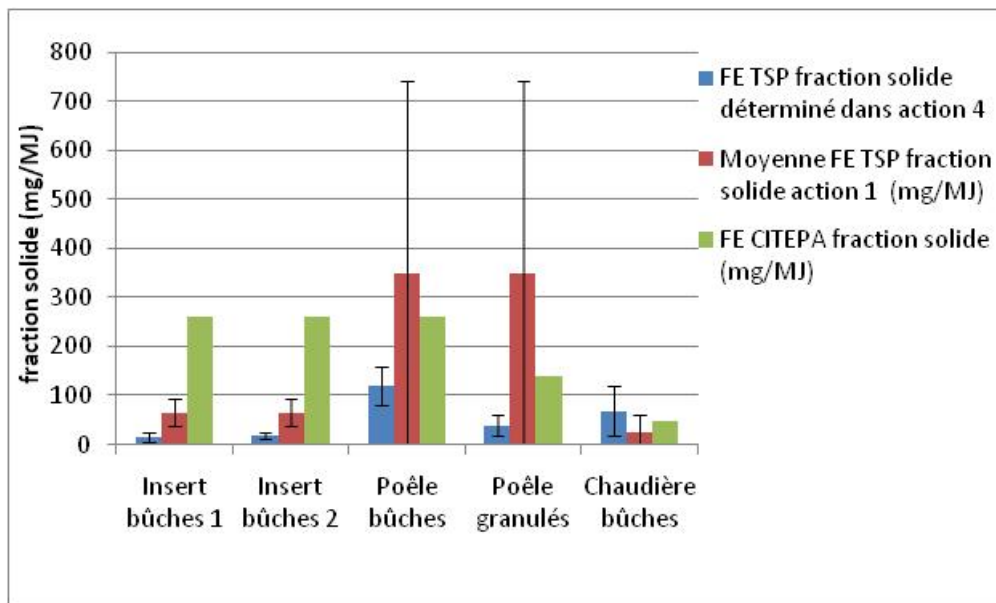


Figure 15 : Comparaison* des facteurs d'émission déterminés pour la fraction solide des particules totales

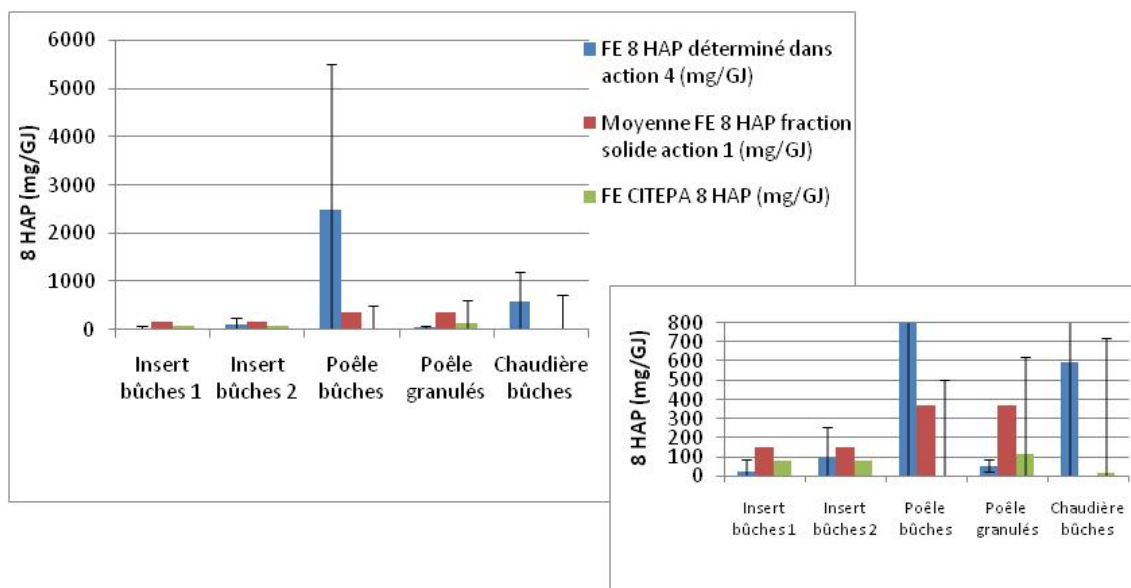


Figure 16 : Comparaison* des facteurs d'émission déterminés pour les HAP

*on rappelle ici que les conditions d'essais étaient dégradées lors des essais avec le poêle bûches et la chaudière bûches, ce qui peut conduire à une augmentation des facteurs d'émission par rapport à un fonctionnement en conditions nominales

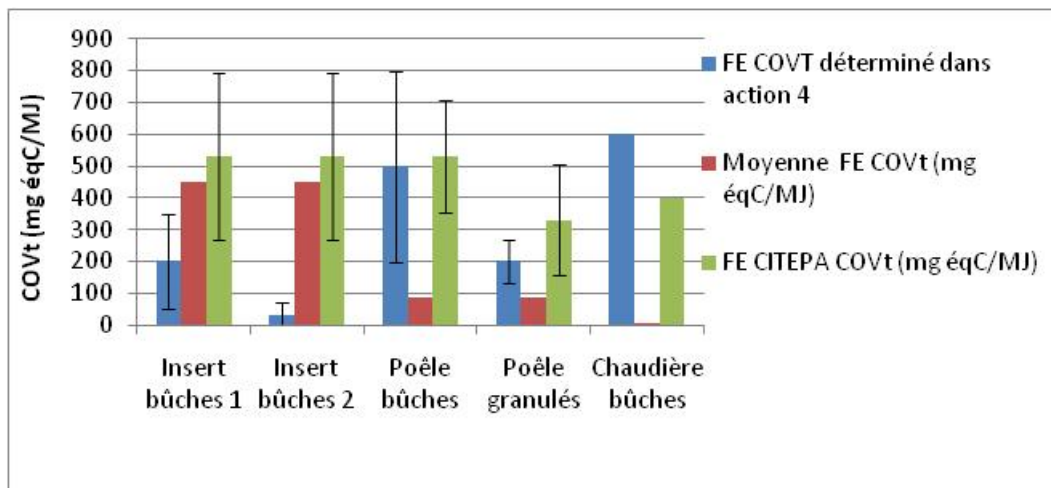


Figure 17 : Comparaison des facteurs d'émission déterminés pour les COVt

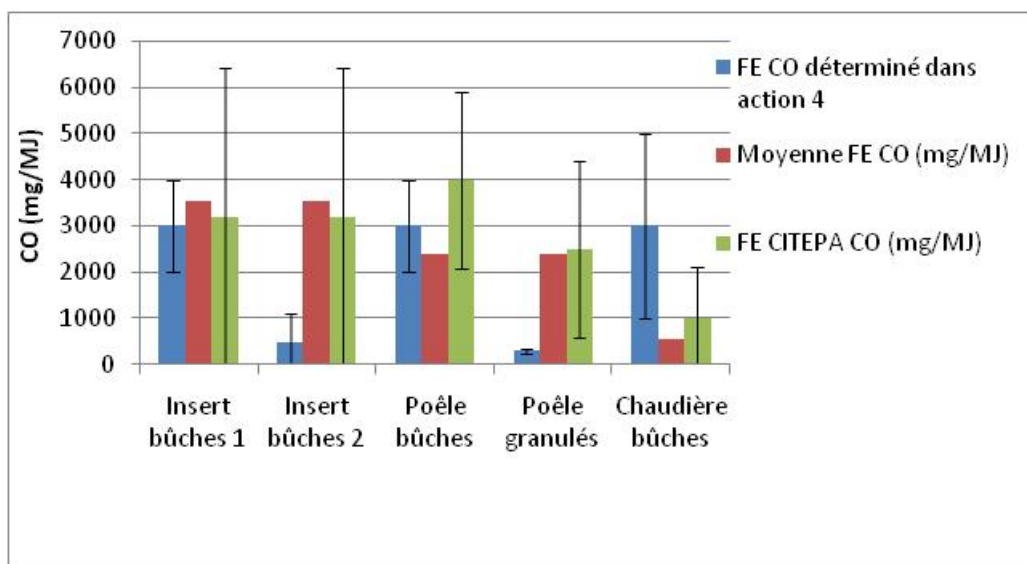


Figure 18 : Comparaison des facteurs d'émission déterminés pour le CO

On observe tout d'abord, que pour tous les polluants considérés, les facteurs d'émission déterminés pour la chaudière dans le cadre de l'action 4 sont supérieurs à ceux collectés dans le cadre du projet et utilisés dans les inventaires par le CITEPA. Ceci pour deux raisons majeures :

- en premier lieu, en raison de la présence du cyclone en aval, la chaudière n'a pas fonctionné en régime nominal pendant les essais ; la combustion obtenue était dégradée, ce qui favorise des émissions élevées.
- ensuite, les FE collectés dans le cadre du projet et utilisés dans les inventaires par le CITEPA sont génériques des chaudières et ne tiennent pas compte du combustible utilisé.

De plus, pour le poêle à granulés et les deux inserts à bûches, les facteurs d'émission déterminés sont inférieurs à ceux collectés dans le cadre du projet et utilisés dans les inventaires par le CITEPA. Pour le poêle à granulés, une explication peut être que les FE collectés dans le cadre du projet et utilisés dans les inventaires par le CITEPA sont génériques des poêles et ne tiennent pas compte du combustible utilisé.

Il est à noter également que lors de l'utilisation de ces appareils par les particuliers, toutes les règles d'usage ne sont pas forcément respectées (humidité et qualité du combustible, méthode d'allumage, réglage de l'air, etc.) L'inventaire national a pour but d'estimer au mieux les émissions réelles, c'est pourquoi les facteurs d'émission de l'inventaire peuvent être supérieurs aux facteurs d'émission déterminés en laboratoire.

FACTEURS D'EMISSION DETERMINES POUR LA FRACTION SOLIDE DES PARTICULES TOTALES :

D'une manière générale, hormis pour la chaudière à bûches, on observe que les FE déterminés dans le cadre de l'action 4 sont faibles en comparaison de ceux collectés par la CITEPA dans le cadre du projet d'une part, et utilisés dans les inventaires nationaux d'autre part.

Pour les inserts bûches, les FE déterminés dans cette action, bien que plus faibles, sont du même ordre de grandeur que ceux collectés dans le cadre de l'action 1 par le CITEPA. En revanche, les FE utilisés pour les inventaires sont très élevés par rapport à ceux collectés et déterminés dans le cadre du projet.

Pour le poêle à granulés, l'écart très important observé peut s'expliquer par le fait que les données du CITEPA intègre tous types de poêles, les FE obtenus sont donc plus élevés que s'ils étaient spécifiques au poêle à granulés. On notera par ailleurs que le fait d'intégrer tous les types génère une dispersion importante des données qui se traduit par des écarts types élevés.

FACTEURS D'EMISSION DETERMINES POUR LES HAP

On notera tout d'abord que les écarts types associés aux FE HAP sont très élevés.

Comme pour les TSP solides, les FE déterminés dans le cadre de l'action 4 pour les inserts et le poêle à granulés sont faibles en comparaison à ceux collectés par le CITEPA dans le cadre du projet d'une part, et utilisés dans les inventaires nationaux d'autre part. En revanche pour le cas du poêle et de la chaudière à bûches, la tendance inverse est observée. Celle-ci doit être relativisée compte tenu des écarts types très élevés observés, Elle peut cependant s'expliquer par le fait que les données présentées par le CITEPA ne sont pas spécifiques du combustible bûches, ce qui peut conduire à une sous-estimation des facteurs d'émission proposés.

FACTEURS D'EMISSION DETERMINES POUR LES COVT ET LE CO

Pour les COVT et le CO, mis à part pour la chaudière bûches, les FE déterminés sont inférieurs à ceux collectés dans le cadre du projet et utilisés dans les inventaires par le CITEPA.

CONCLUSIONS SUR LA COMPARAISON DES FACTEURS D'EMISSION

La comparaison des facteurs d'émission utilisés pour la réalisation des inventaires avec ceux collectés dans le cadre du projet Peren2Bois a montré des différences qui sont principalement liées :

- au fait que les facteurs d'émission utilisés par le CITEPA ont vocation à représenter les émissions de polluants en conditions réelles, alors que les données collectées dans le cadre du projet ont été obtenues dans des conditions de laboratoires (fonctionnement optimal, bois normalisé, humidité contrôlée, etc.).
- pour les émissions de particules, à l'hétérogénéité des méthodes de détermination. La méthode de mesurage mise en œuvre n'est pas systématiquement associée au résultat présenté, de ce fait, il est donc difficile de savoir si la valeur correspond à la fraction solide seule par exemple. Ceci renforce la nécessité d'une méthode de mesure commune au niveau européen, mise en avant par le projet EN_PME_TEST financé par l'ADEME et qui a démarré début 2012.
- pour les poêles et les chaudières, à la non différenciation des facteurs d'émission utilisés par le CITEPA pour réaliser les inventaires en fonction du combustible utilisé. Pour ces systèmes, la nature du combustible est un facteur d'influence important des émissions atmosphériques

Une actualisation des facteurs d'émission basée sur la prise en compte des études récentes sur le sujet paraît donc nécessaire. Il pourrait être judicieux que cette actualisation s'appuie notamment sur les résultats à venir de l'étude ADEME « Evaluation des impacts sur la qualité de l'air des actions de modernisation du parc d'appareils de chauffage au bois à Lanslebourg ». En effet, une synthèse bibliographique des connaissances de ces facteurs d'émissions est prévue dans le cadre de cette étude, coordonnée par le LCME, en lien avec Air Rhône-Alpes, l'INERIS et le LERMAB.

3.4.2.2.2 COMPARAISON DES FACTEURS D'EMISSIONS SELON LES PHASES DE COMBUSTION

En termes de hiérarchisation des phases, les observations suivantes ont pu être faites sur les données collectées par le CITEPA en début de projet et sur celles déterminées dans le cadre de l'action 4 :

- pour tous les appareils et tous les polluants, la phase de démarrage est la plus émissive,
- cette tendance est plus marquée pour les inserts et le poêle à bûches que pour la chaudière à bûches. Pour la chaudière à bûches, on n'observe pas de différence notable entre les phases.

En revanche, en ce qui concerne la phase d'arrêt, il est plus difficile de conclure. Des tendances différentes ont en effet été observées dans les différentes études. Les données issues d'études réalisées spécifiquement (25;26) sur le sujet ainsi que celles générées dans le cadre de l'action 4 indiquaient que la phase d'arrêt était plus émissive que la phase de combustion vive alors que celles fournies par les constructeurs lors de l'action 1 indiquent un comportement inverse.

3.5 ACTION 5 : UTILISATION POTENTIELLE D'INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX POUR EVALUER LES POLITIQUES DE REDUCTION DES EMISSIONS DE POLLUANTS ATMOSPHERIQUES

3.5.1 LES INDICATEURS DE LA COMBUSTION DE BIOMASSE

La quantification de l'influence d'une source particulière sur la qualité de l'air nécessite de disposer de données mesurables relativement spécifique à cette source. Parmi les différentes méthodologies développées ces dernières années pour réaliser cette quantification, nombre d'entre elles s'appuient sur la détermination au sein de l'aérosol atmosphérique de signatures chimiques spécifiques à la source ou l'identification de composés dits source-spécifique ou traceurs. Dans le cas d'étude de l'influence de sources d'émission, la notion de traceur indique pour le composé considéré l'unicité de la source et implique également une relative stabilité chimique dans le milieu atmosphérique. Si cette dernière condition est difficile à vérifier, le terme d'indicateur est alors préféré.

La combustion de biomasse s'accompagne d'émissions importantes de particules se caractérisant par des taux d'émission de carbone organique (OC) supérieurs à celles des combustibles fossiles (27,28,29). La recherche de traceurs ou d'indicateurs de la combustion de biomasse a donc été réalisée ces dernières années majoritairement au sein des familles chimiques qui constituent l'OC. Parmi les composés présent dans l'OC, les déshydrimonosaccharides issus de la dégradation thermique de la cellulose et de l'hémicellulose constituent les composés organiques les plus émis par la combustion de biomasse (30,31,32,33). De plus ces composés ne sont pas détectés dans les aérosols issus de la combustion des combustibles fossiles, ou encore dans ceux provenant de la biodégradation et de l'hydrolyse de la cellulose (33). Ces caractéristiques font donc de ces composés des molécules organiques très spécifiques de la combustion de biomasse.

Avec des facteurs d'émission rapportés dans la littérature compris entre une dizaine de mg.kg^{-1} et plusieurs milliers de mg.kg^{-1} , le lévoglucosan (1,6-anhydro- β -D-glucopyranose) est le déshydrimonosaccharide le plus émis par la combustion de la biomasse. D'autre part, la contribution du lévoglucosan au sein des $\text{PM}_{2.5}$ et du OC est environ 2 à 3 fois plus importante pour la combustion du bois comparé à celle des autres types de biomasse. Les deux isomères du lévoglucosan, le galactosan et mannosan, sont quant à eux émis à des niveaux bien plus faibles.

De plus lors de la combustion du bois, les facteurs d'émission du lévoglucosan et de ses isomères varient beaucoup en fonction à la fois de la nature de bois et du type de foyer de combustion (28,29,30,34,35,36,37). Ainsi par exemple, les combustions de bois tendres se distinguent de celles des bois durs par des contributions de mannosan en moyenne environ 2 à 3 fois plus importantes.

Le lévoglucosan est considéré comme une molécule relativement stable dans l'atmosphère (38). Il a ainsi été détecté à l'état de trace au dessus de l'océan atlantique loin des sources de combustion. Des études récentes réalisées en laboratoire ont cependant montré une possible oxydation de ce composé par les radicaux hydroxyles dans la phase aqueuse des aérosols ⁽³⁹⁾.

Toutefois, les importants facteurs d'émission de ce composé, sa spécificité vis à vis de la combustion de biomasse, associés à sa stabilité atmosphérique en fait le traceur le plus largement utilisé actuellement dans les études de l'influence de la combustion de biomasse sur les concentrations en particules en atmosphères ambiantes ^(40,41).

Associées principalement au mode fin de l'aérosol, les concentrations atmosphériques moyennes en lévoglucosan subissent des variations saisonnières très marquées. Elles sont de l'ordre de la dizaine de ng.m^{-3} en été et peuvent culminer jusqu'à plusieurs $\mu\text{g.m}^{-3}$ en période hivernale ^(41,42). En France, un programme de suivi de la concentration de ce traceur sur des sites urbains a été initié à partir de l'hiver 2007 à la demande du MEDDAD ⁽⁴³⁾. Les premiers résultats réalisés sur des sites localisés dans les agglomérations de Grenoble, Strasbourg, Paris et Lille ont mis en évidence des concentrations atmosphériques en lévoglucosan du même ordre de grandeur que celles observées dans la littérature sur de grands centres urbains aux Etats Unis ou en Europe ^(44, 45). D'autre part, cette étude a mis en évidence à partir de l'utilisation de ce traceur, une contribution importante (de 10 à 40%) de la combustion de la biomasse à la concentration en PM_{10} . Ce type de résultat a été confirmé par de nombreux travaux menés ces dernières années en France sur les sources de particules (Programme Primequal Formes, Etude Particul'Air ADEME...)

3.5.2 OBJECTIFS

Les conclusions de la première étude menée en 2007 ⁽⁴³⁾, ont conduit à pérenniser le mesurage de ces traceurs sur une base annuelle sur des sites urbains en associant également le mesurage des paramètres OC et EC (carbone organique et carbone élémentaire) caractérisant la fraction organique des aérosols. Ce type de suivi en continu doit permettre d'évaluer l'effet des politiques mises en place pour la réduction des émissions.

Les travaux qui sont menés dans l'action 5 du projet PEREN²Bois, ont pour objectifs de déterminer les facteurs d'émissions du Levoglucosan, de l'OC et l'EC pour les dispositifs de combustion ciblés dans le projet. L'influence des procédés de traitement primaires ou secondaires évalués dans ce projet sur les facteurs d'émission de ces indicateurs est également étudiée.

3.5.3 METHODOLOGIE

En atmosphère ambiante, le lévoglucosan et ses deux isomères sont présents essentiellement en phase particulaire. Les premiers travaux réalisés en France sur la quantification des facteurs d'émission de ces composés ont été effectués dans le cadre du projet «Evaluation de l'impact des appareils de chauffage à bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur » ^(46,42) en explorant uniquement la fraction particulaire. Les prélèvements avaient été réalisés dans les conditions normalisées en veine chauffée et avaient conduit à des valeurs de facteurs d'émission relativement faibles vis à vis des données de la littérature majoritairement générées à partir de dispositif de prélèvement avec dilution.

Dans le cadre du projet PEREN²Bois, l'analyse du lévoglucosan a été réalisée à la fois sur les filtres de collecte et sur les extraits issus des résines XAD pour la collecte de la fraction volatile des hydrocarbures.

Par conséquent les résultats présentés ici ne prennent pas en compte la fraction de lévoglucosan qui pourrait être piégée dans les condensats.

3.5.4 RESULTATS

3.5.4.1 FACTEURS D'EMISSION

Les facteurs d'émissions du lévoglucosan et de ces 2 isomères ont été déterminés sur l'ensemble des essais des actions 3 et 4 (Tableau 39). Les résultats prennent en compte à la fois la fraction gazeuse et particulaire de ces composés. Comme attendu, le lévoglucosan est le composé le plus émis des deshydromonosaccharides étudiés. Cette prédominance du lévoglucosan est en effet en accord avec l'ensemble des études menées à l'émission (28-30,34-37).

Cependant, les facteurs d'émission présentent une variabilité assez forte en fonction des dispositifs de combustion utilisés. Les facteurs d'émission évoluent de 0,2 à 216 mg/kg de bois. Les valeurs moyennes les plus faibles sont observées pour les essais réalisés sur les matériaux des foyers et n'excèdent pas 4 mg/kg. Globalement, l'ensemble de ces résultats se situe dans le bas de la gamme des valeurs rapportées dans la littérature pour les émissions de la combustion de bois. A titre d'exemple, les facteurs d'émission en lévoglucosan déterminés aux USA lors de la combustion de bois durs sont de $169 \pm 82 \text{ mg.kg}^{-1}$ pour les foyers fermés et de $642 \pm 317 \text{ mg.kg}^{-1}$ pour les foyers ouverts (31, 34-36). Ces résultats ont cependant été obtenus avec des conditions de prélèvements très différentes basées sur l'utilisation de dispositif de dilution des émissions. Les valeurs obtenues dans notre étude sont toutefois plus importantes que les facteurs d'émission déterminés à partir seulement de la phase particulaire pour des appareils de chauffage au bois pour des logements individuels (46, 42).

Enfin, à ce stade de l'étude il est difficile d'expliquer les faibles valeurs des facteurs d'émission déterminées lors des tests sur les matériaux des foyers. Les conditions de combustion et notamment la température de combustion peuvent affecter la formation des déhydromonosaccharides (^{47, 48, 49}).

Tableau 39 : Facteurs d'émission moyens en lévoglucosan, mannosan et galactosan obtenus au cours de l'étude PEREN²Bois.

Essai		Levoglucosan (mg/kg de bois)	Mannosan (mg/kg de bois)	Galactosan (mg/kg de bois)
Insert bûche Zumikron (CERIC 2009)	Amont	96.00	<dl	1.90
	Aval	102.83	nd	nd
Poêle Buches R_ESP (CTIF 2010)	Amont	11.48	0.50	0.70
	Aval	5.51	nd	nd
Poêle granulés R_ESP (CTIF 2010)	Amont	10.90	1.02	0.00
	Aval	10.76	nd	nd
Chaud. Bûche Cyclone ACS (CERIC 2010)	Amont	31.00	3.91	1.72
	Aval	26.61	<dl	<dl
Insert Bûche Catalyseur (CERIC 2011)	Sans	215.84	43.04	0.00
	Avec	33.62	nd	nd
Air Primaire (LERMAB)	Fonte	0.74	0.05	0.05
	Vermiculite	0.39	0.02	0.03
	Réfractaire	2.22	0.15	0.40
Air primaire+ secondaire (LERMAB)	Fonte	0.91	0.06	0.10
	Vermiculite	0.90	0.06	0.08
	Réfractaire	4.34	0.35	0.35
	Catalyseur	0.24	0.06	0.01

<dl : inférieur à la limite de détection, nd : non déterminé

3.5.4.2 REPARTITION GAZ PARTICULE DU LEVOGLUCOSAN A L'EMISSION

La répartition gaz-particule du lévoglucosan peut être étudiée à partir de la détermination de la fraction particulaire du composé (Figure 19). La fraction particulaire représente de 10 à 100% de la concentration totale en lévoglucosan dans les émissions. Dans le cas des tests réalisés avec des dispositifs de filtration (Figure 19), la répartition gaz-particule semble liée à la température des fumées. La fraction particulaire la plus importante (100%) est obtenue pour des températures de fumées les plus faibles (67°C, test poêle à granulés R_ESP). La fraction gazeuse est beaucoup plus importante dès que les températures s'élèvent et peut représenter en moyenne jusqu'à 47 % de la concentration totale avant le dispositif de traitement.

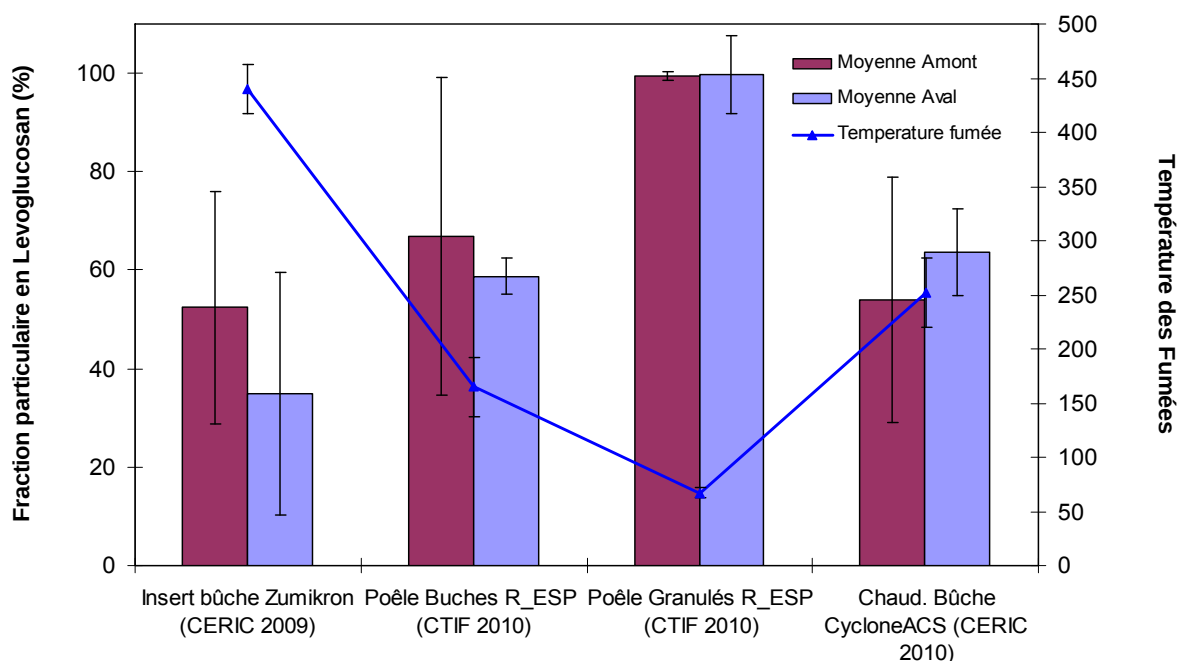


Figure 19 : Fraction particulaire de Lévoglucosan et température des fumées pour les essais avec des dispositifs de traitement secondaire

La répartition gaz-particule du lévoglucosan évolue de manière peu significative après le dispositif de traitement. La plus grande modification concerne l'essai mené sur un insert équipé de l'électrofiltre Zumikron pour lequel la fraction particulaire moyenne évolue de 52% avant le filtre à 35 % après.

Dans le cas de l'utilisation de catalyseur pour le traitement, la fraction particulaire reste importante (80%) et ceci même dans le cas de température de fumée relativement importante puisqu'elles sont proches de 520°C dans le cas des essais CERIC 2011 (Figure 20). En revanche les tests sur les matériaux du foyer montrent des fractions particulaires les plus faibles et ne représente que 10% de la concentration totale lors de l'utilisation du matériau Réfractaire en présence d'air primaire uniquement. Si pour les matériaux Fonte et Vermiculite, l'addition d'air secondaire ne modifie pas de façon significative la partition gaz-particule du lévoglucosan, une augmentation importante de la fraction particulaire est observée dans le cas du matériau Réfractaire (de 10 à 64%). Ce comportement peut être relié à l'augmentation importante des émissions en PM_{10} observées lors de l'ajout d'air secondaire. Toutefois les mesures en lévoglucosan lors de ce dernier essai sont très dispersées.

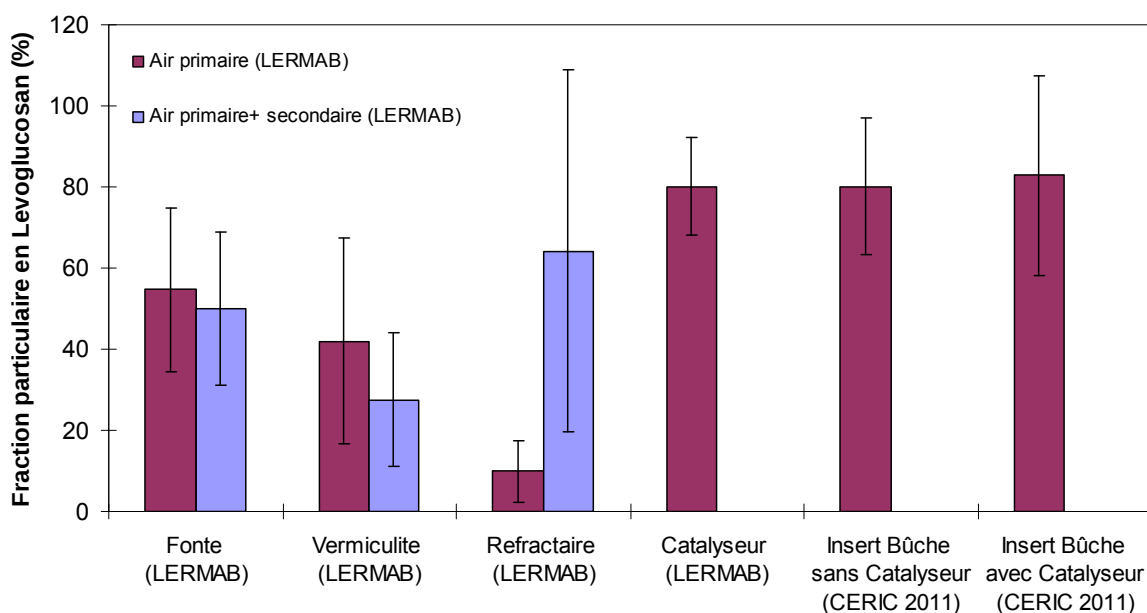


Figure 20 : Fraction particulaire de Lévo-glucosan obtenue sur les tests de matériaux et de traitement par catalyseur

3.5.4.3 EFFET DES TECHNIQUES DE REDUCTION PRIMAIRES ET SECONDAIRES SUR LES EMISSIONS DE LEVOGLUCOSAN

3.5.4.3.1 INFLUENCE DES MATERIAUX ET CATALYSE (ACTION 3)

Le Tableau 40 rapporte les concentrations moyennes en lévoglucosan et de la matière carbonée particulaire corrigées à 13% de O₂ dans le cas de l'utilisation de différents matériaux constitutifs du foyer de combustion (essais action 3).

Comme cela a déjà été discuté dans le cas des facteurs d'émissions, l'ensemble de ces essais a conduit aux concentrations les plus faibles en lévoglucosan avec des valeurs moyennes comprises entre 21 et 396 µg/m³. En revanche les concentrations en OC, EC et TC restent dans la même gamme que les valeurs observées lors de essais de l'action 3. Ces résultats semblent conforter l'hypothèse de conditions de combustion limitant la formation du lévoglucosan. D'autre part, il apparaît que l'ajout d'air secondaire entraîne une augmentation des rejets à la fois du lévoglucosan et du TC, quel que soit le matériau utilisé. C'est avec la fonte que cet effet est le moins marqué. L'influence de l'ajout d'air secondaire sur les conditions de combustion et notamment sur la température de combustion pourrait expliquer ce comportement.

Tableau 40 : Concentrations moyennes en Levoglucosan, carbone organique (OC), carbone élémentaire (EC) et carbone total (TC) à 13% de O₂

Essai		Levoglucosan ($\mu\text{g}/\text{m}_0^3$ à 13% de O ₂)	OC (mg/m_0^3 à 13% de O ₂)	EC (mg/m_0^3 à 13% de O ₂)	TC (mg/m_0^3 à 13% de O ₂)
Air Primaire (LERMAB)	Fonte	67,2	14,0	7,0	21,0
	Vermiculite	34,8	20,0	4,0	24,0
	Réfractaire	202,4	15,0	2,0	17,0
Air primaire+ secondaire (LERMAB)	Fonte	82,8	17,5	9,5	27,0
	Vermiculite	80,3	61,0	5,0	66,0
	Réfractaire	396,8	42,0	13,0	55,0
	Catalyseur	21,2	-	-	-

3.5.4.3.2 TECHNIQUES DE TRAITEMENT SECONDAIRE (ACTION 4)

Le Tableau 41 présente les concentrations moyennes en lévoglucosan et de la matière carbonée particulaire corrigées à 13% de O₂ dans le cas de l'utilisation de dispositif de filtration obtenues lors des essais de l'action 4.

Tableau 41 : Concentrations moyennes en Levoglucosan, carbone organique (OC), carbone élémentaire (EC) et carbone total (TC) à 13% de O₂

Essai		Levoglucosan ($\mu\text{g}/\text{m}_0^3$ à 13% de O ₂)	OC (mg/m_0^3 à 13% de O ₂)	EC (mg/m_0^3 à 13% de O ₂)	TC (mg/m_0^3 à 13% de O ₂)
Insert bûche Zumikron (CERIC 2009)	Amont	9391,9	9,9	9,6	19,5
	Aval	10069,7	5,6	5,0	10,6
Poêle Buches R_ESP (CTIF 2010)	Amont	2593,1	10,6	21,4	31,9
	Aval	947,9	1,3	4,1	5,5
Poêle Granulés R_ESP (CTIF 2010)	Amont	1836,7	0,6	3,0	3,7
	Aval	1850,9	0,2	1,2	1,4
Chaud. Bûche Cyclone ACS (CERIC 2010)	Amont	3665,8	56,5	21,0	77,6
	Aval	3120,5	48,4	18,6	67,0
Insert Bûche Catalyseur (CERIC 2011)	Sans	17928,2	1,4	13,8	15,2
	Avec	2997,2	2,1	13,1	15,2

Les concentrations totales en lévoglucosan les plus importantes ont été déterminées lors de ces essais et se situent entre 948 et 17928 $\mu\text{g}/\text{m}_0^3$. Dans le même temps les concentrations moyennes en OC, EC et TC sont dans des gammes de concentration de plus grande ampleur.

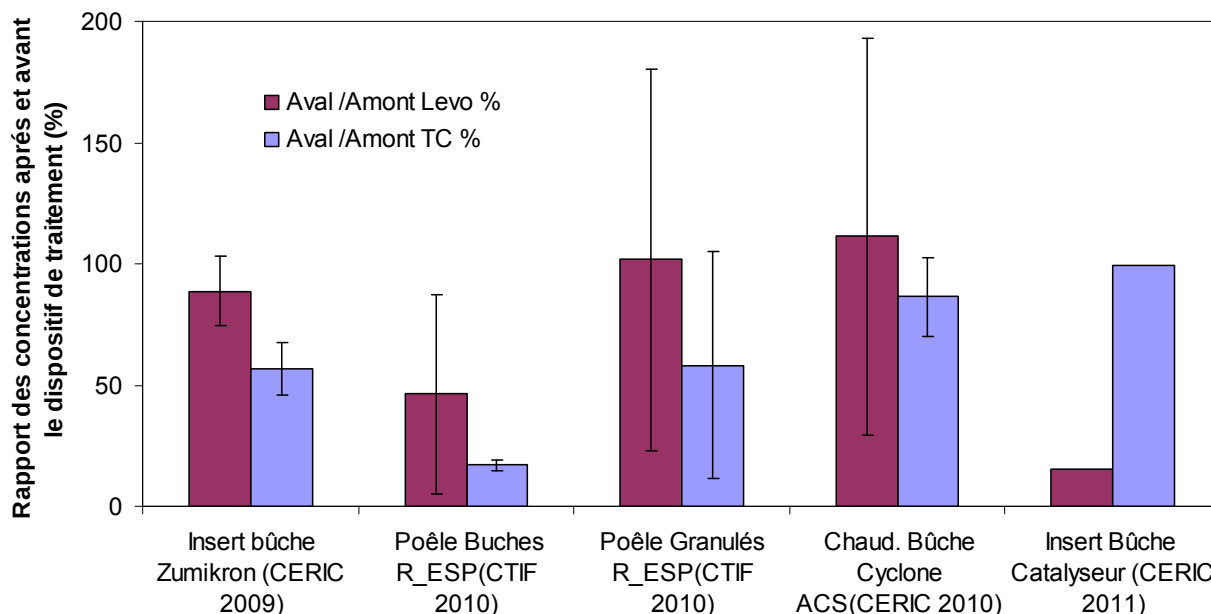


Figure 21 : Rapports des concentrations en lévoglucosan et en TC (à 13% de O_2) mesurées en aval sur les concentrations en amont du dispositif de traitement. Dans le cas de l'étude CERIC 2011, le rapport a été calculé entre les concentrations mesurées sans catalyseur et les concentrations mesurées en présence du catalyseur

Le rapport des concentrations mesurées en amont du dispositif de traitement sur les concentrations mesurées en aval, permet d'évaluer l'effet du traitement sur les émissions des composés (Figure 21). Les rapports moyens calculés pour les éléments de la matière carbonée particulaire, sont associés à des dispersions très fortes pour l'OC et l'EC lors des essais respectivement CTIF 2010 et CERIC 2010. Ces dispersions sont à lier avec la difficulté de réaliser le mesurage de l'OC et l'EC sur des échantillons fortement chargés en matière organique. En conséquence, il apparaît plus pertinent de discuter dans ce cas de l'évolution des rapports de carbone total (TC).

Vis-à-vis du lévoglucosan, seuls les essais réalisés sur le poêle à bûches équipé du dispositif de filtration R_ESP et l'insert à bûches équipé du catalyseur conduisent à une diminution significative des rejets en lévoglucosan, avec respectivement des abaissments de 54% et 83% des concentrations. Il est à noter que le même dispositif de filtration (R_ESP), associé à un poêle à granulés, ne conduit pas à un abaissement des concentrations en lévoglucosan. Cette différence de comportement est également observable dans le cas du TC. Le rapport entre les concentrations aval et amont en TC sont en effet de 17% et 58% pour le poêle à bûches et le poêle à granulés, respectivement. L'utilisation du dispositif Zumikron conduit à une diminution de 10% des concentrations en lévoglucosan.

Globalement, à l'exception de l'utilisation du catalyseur, les abattements des concentrations en TC et lévoglucosan, en fonction des essais, suivent la même tendance. Les diminutions des concentrations en lévoglucosan sont cependant toujours plus faibles en raison certainement de sa présence en partie dans la phase gazeuse moins impactée par les procédés de filtration utilisés.

En revanche un comportement totalement opposé et difficilement explicable est obtenu lors de l'utilisation du catalyseur alors que dans ce cas le lévoglucosan est présent essentiellement en phase particulaire.

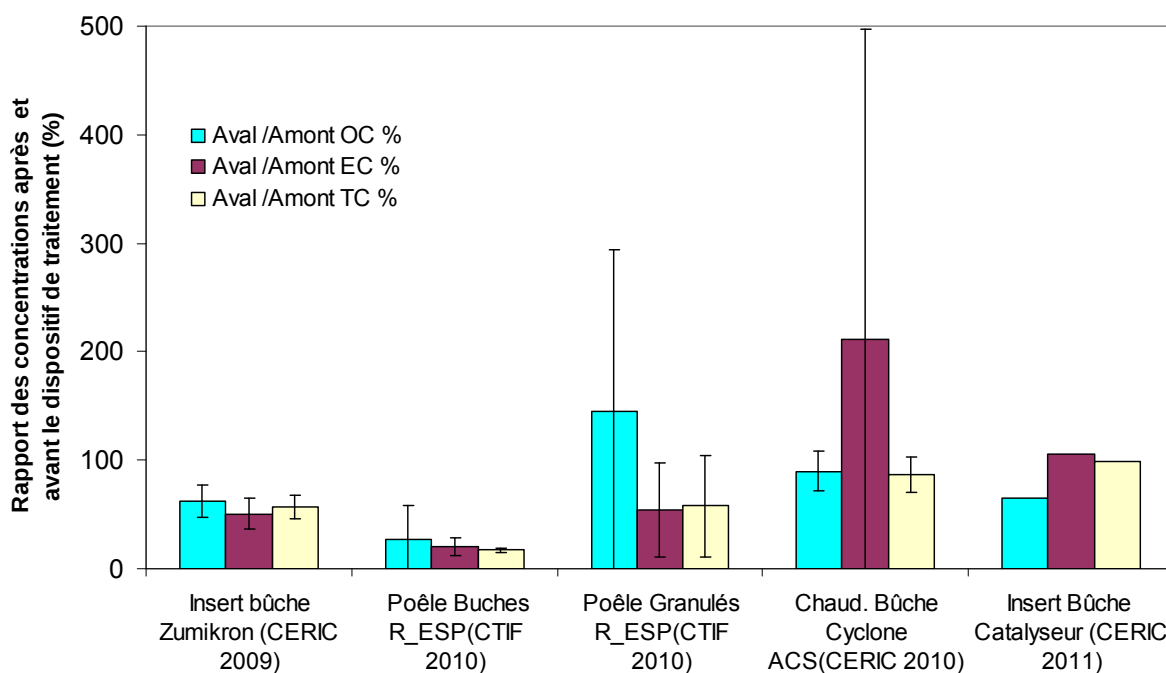


Figure 22 : Rapports des concentrations en OC, EC et TC (à 13% de O₂) mesurées en aval sur les concentrations en amont du dispositif de traitement. Dans le cas de l'étude CERIC 2011, le rapport a été calculé entre les concentrations mesurées sans catalyseur et les concentrations mesurées en présence du catalyseur

3.5.5 CONCLUSION RELATIVE A L'UTILISATION D'INDICATEURS ENVIRONNEMENTAUX POUR EVALUER LES POLITIQUES DE REDUCTION

Les mesurages effectués sur les différents essais ont montré la présence de composés de la famille des dehydromonosaccharides issus de la dégradation thermique de la cellulose. Le lévoglucosan est le plus émis mais avec des facteurs d'émissions compris entre 0,2 à 216 mg/kg de bois suivant les essais. D'autre part, les travaux ont permis de montrer que dans les conditions de prélèvement utilisées ce composé était présent à la fois dans la phase gazeuse et la phase particulaire. La fraction particulaire représente de 10 à 100% de la concentration totale suivant le type d'essai.

L'utilisation des dispositifs de filtration testés dans le cadre de PEREN²Bois conduit à des abaissements des concentrations en lévoglucosan relativement faibles. Seul le dispositif de filtration R_ESP associé à un poêle à bûches conduit à une réduction de 54% des rejets en lévoglucosan.

D'autre part, le taux d'abattement est toujours inférieur à celui obtenu pour le TC mettant en évidence l'effet limité de ces dispositifs sur la fraction gazeuse. En revanche l'utilisation de la filtration à base de catalyseur réduit de 83% les émissions de lévoglucosan. Cependant, les résultats ne sont pas confortés par les mesures de TC limitant la représentativité de ce comportement.

Les émissions les moins importantes en dehydromonosaccharides ont été observées dans le cas des essais sur les matériaux des foyers de combustion et pourraient être liées aux conditions de combustion moins favorables à la formation du lévoglucosan. La modification de ces conditions par l'ajout d'air secondaire a pour conséquence une augmentation du taux de matière organique particulaire et de lévoglucosan quel que soit le matériau utilisé dans le foyer.

Enfin, si le lévoglucosan demeure un traceur incontournable pour quantifier l'influence de la combustion de biomasse notamment sur les pollutions particulaires, sa présence en phase gazeuse dans les rejets devra être prise en compte pour évaluer les effets des dispositifs de réduction des émissions de particules par les appareils de chauffage au bois.

3.5.6 VALORISATION INDUSTRIELLE DES RESULTATS DU PROGRAMME PEREN²BOIS (ACTION 6)

3.5.6.1 OBJECTIF

L'objectif de cette action a été de faire la synthèse des connaissances acquises lors des actions précédentes afin :

- de réaliser des fiches de bonnes pratiques à destination du grand public et relatives au thème de la combustion du bois,
- de dresser une liste de recommandations à prendre en compte pour l'installation d'un système de traitement.

3.5.6.2 FICHES DE BONNES PRATIQUES

L'objectif de ces fiches est de proposer des éléments visant à améliorer les conduites des utilisateurs dans le but d'optimiser l'utilisation des appareils de combustion au bois sur le plan énergétique et environnemental

Sept fiches qui font l'objet du produit de sortie « Fiches de bonnes pratiques, visant à limiter les émissions de poussières fines et de composés organiques, à destination des utilisateurs », sont présentées en annexe, elles traitent des thèmes suivants :

- **Fiche 1 : La combustion du bois**
- **Fiche 2 : Les polluants atmosphériques émis par la combustion du bois**
- **Fiche 3 : Les techniques de réduction des polluants**
- **Fiche 4 : Le combustible**
- **Fiche 5 : L'appareil et son installation**
- **Fiche 6 : L'allumage manuel**
- **Fiche 7 : fonctionnement et régimes de combustion**

3.5.7 RECOMMANDATIONS AUX INDUSTRIELS

Compte tenu du manque de recul sur les techniques secondaires, principalement dû au fait que les technologies sont peu matures et qu'il n'existe pas de marché développé, il ne sera pas formulé de recommandations tranchées quant au choix d'une technologie plutôt qu'une autre, et ce malgré le fait que l'électrofiltre R_ESP est apparu lors de l'étude comme la technologie la plus performante en termes d'épuration vis-à-vis des espèces particulières. Ces recommandations sont présentées dans le produit de sortie : « Recommandation pour l'élaboration d'un cahier des charges en vue de la conception d'un système de traitement ». des informations complémentaires concernant les caractéristiques des techniques testées sont disponibles dans le rapport publié fin 2011 (20) par un groupe d'experts internationaux dans le cadre des travaux de l'International Energy Agency (IEA) qui présente un bilan des connaissances sur l'efficacité des techniques secondaires de réduction des émissions issues de la combustion domestique du bois.

On peut distinguer les contraintes concernant l'ensemble des techniques secondaires de traitement testées de celles propres à chaque technique.

Tout d'abord les quatre techniques testées :

- o nécessitent une adaptation permettant le couplage à une technique primaire,
- o doivent être facilement démontables ou accessibles pour permettre un entretien régulier.
- o nécessitent le respect de l'obligation réglementaire de deux ramonages annuels ⁽⁵⁰⁾

Les contraintes propres à chaque technique ainsi que les solutions permettant d'y répondre sont présentées dans le tableau suivant, ces contraintes sont de cinq ordres :

- o contraintes économiques,
- o contraintes de mise en œuvre, y compris réglementaires,
- o contraintes d'intégration au bâti,
- o contraintes d'entretien,
- o contraintes en termes d'efficacité d'épuration.

Tableau 42 : Synthèse des contraintes pouvant être associées à chaque technique avec pour chaque contrainte les verrous associés et les potentielles solutions*

Technique	Type de contraintes*	Verrou	Solution
Electrofiltre Zumikron : environ 1200 unités installées en Europe R_ESP : quelques unités tests installées	Mise en œuvre	Présence de Haute tension	
		Pas de législation existante associée à la présence de haute tension dans les logements	Si technique amenée à se développer, une évolution de la législation nécessaire pour encadrer l'autorisation de ces technologies en termes d'installation, d'utilisation et d'entretien. Dans l'attente, constructeurs souhaitant se « couvrir » sur le plan de la législation vis-à-vis de ce risque pourraient souhaiter passer par la réalisation d'un avis technique : Démarche consommatrice de temps et coûteuse. Démarche difficilement envisageable pour les petites et moyennes entreprises, Peut se justifier si la technologie permet de répondre à une demande forte du marché.
		Personnel non habilité au niveau électrique	Intervention de personnel de corps de métiers différents : difficile en pratique
		Risque incendie accru	Nécessité de protéger la partie haute tension de l'électrofiltre
		Non visible	Indiquer la présence d'une électrode haute tension sur une plaque située à l'extérieur du conduit
		Fonctionnement Electrode	
		Si le conduit est désaxé par rapport à la verticale, cela peut engendrer des problèmes de dysfonctionnement de l'électrode (risque de claquages électriques entre les électrodes).	
		Corrosion de l'électrode :	
		Electrofiltre dans le conduit : hautes températures et effluents condensables corrosifs ; Electrofiltre en extrémité de conduit : problème de corrosion accru car condensation plus importante à faibles températures ;	Utiliser des matériaux résistants à la corrosion

<u>Technique</u>	<u>Type de contraintes*</u>	<u>Verrou</u>	<u>Solution</u>
<u>Electrofiltre</u>	<u>Type de contraintes</u> <u>Mise en œuvre</u>	<u>Verrou</u>	<u>Solution</u>
		<u>Entretien Type R_ESP : en bout de conduit</u>	Personnel habilité au travail en hauteur
		Entretien ramonage par le haut contraire aux pratiques françaises	
	<u>Intégration au bâti</u>	<u>Type Zumikron : Electrode de collection = conduit de 1.5 m situé en aval du foyer</u> Incompatible avec code de construction français⁵¹	Ne pas utiliser le conduit comme électrode de collection
	<u>Efficacité de filtration :</u>	- R_ESP efficacité élevée sur fraction solide TSP 80-84% / Zumikron efficacité moyenne sur fraction solide TSP 56% - Efficacité nulle sur fraction condensable de l'aérosol - R_ESP efficacité moyenne sur 8 HAP Arrêté 2 Fév 1998 : 53 % - Zumikron efficacité nulle sur 8 HAP Arrêté 2 Fév 1998 - Efficacité nulle sur espèces gazeuses	
		- favorisée pour des températures basses le R_ESP ~180°C / Zumikron ~300°C - tension d'électrode plus élevée permettant un meilleur abattement a été observé entre les deux filtres testés le R_ESP 30 kV / Zumikron 20 kV	- position en extrémité de conduit à privilégier (type R_ESP) - tension d'électrode élevée privilégiée
	<u>Entretien</u>	- R_ESP : système automatique de nettoyage de l'électrode ; - Zumikron : risque d'encrassement de l'électrode observé malgré la présence d'un ventilateur permettant d'éviter l'encrassement, présence d'un panneau lumineux (diode de couleur) informant de l'état d'encrassement ;	

Technique	Type de contraintes*	Verrou	Solution
		- Obligation d'un entretien périodique du conduit et de la technique ; - Connaissance nécessaire de la technique installée par la personne intervenant ; - Intervention de personnel qualifié et habilité au travail électrique ; - Si électrofiltre en bout de conduit difficulté accrue car peu compatible avec les pratiques de ramonage par le bas en France et nécessité de personnels habilités au travail en hauteur ;	
	<u>Economique</u>		
Cyclone Cyclone Hurricane Existe uniquement à l'état de prototype	<u>Mise en œuvre</u>	Présence de pertes de charges nécessitant une assistance mécanique pour évacuer les fumées Non compatible avec législation exigeant un tirage naturel (9, 10) pour les appareils manuels	Coupler à un système de chargement automatique type poêle à granulés ou chaudière
	<u>Efficacité de filtration</u>	- Efficacité limitée sur fraction solide TSP 38% - Possible efficacité sur fraction condensable TSP 15% - Efficacité modérée sur 8 HAP Arrêté 2 Fév 1998 : 25% - Efficacité nulle sur espèces gazeuses	Possibilités d'évolution en intégrant la recirculation des gaz, utilisation de multicyclones
	<u>Entretien</u>	- Intervention possible de l'utilisateur pour vider le « cendrier » du cyclone - Obligation d'un entretien périodique du conduit et de la technique - Connaissance nécessaire de la technique installée par la personne intervenant	
	<u>Economique</u>	Existe uniquement à l'état de prototype à ce jour Surcoût lié à l'intégration d'un ventilateur dans le système	

Technique	Type de contraintes*	Verrou	Solution
Filtre catalytique	Mise en œuvre	Présence de pertes de charges nécessitant une assistance mécanique pour évacuer les fumées Non compatible avec législation exigeant un tirage naturel (9, 10) pour les appareils manuels	Coupler à un système de chargement automatique type poêle à granulés ou chaudière
	Entretien	- Intervention possible par l'utilisateur pour nettoyer le filtre - Nécessité de changer le filtre tous les deux à cinq ans - Obligation d'un entretien périodique du conduit et de la technique - Connaissance nécessaire de la technique installée par la personne intervenant	
	Economique	Surcoût lié à l'intégration d'un ventilateur dans le système pour les appareils indépendants	Utiliser en tant que technique primaire Utiliser avec un appareil fonctionnant avec ventilateur intégré
	Efficacité de filtration	Efficacité nulle sur fraction solide TSP Efficacité élevées sur 8 HAP Arrêté 2 Fév 1998 : 75% Efficacité sur CO : 28% Fonctionnement nécessitant des températures élevées Fonctionnement dégradé en position dans le conduit	Utiliser plutôt en tant que technique primaire avant le conduit de raccordement

4. CONCLUSION

Le projet PEREN²BOIS a été réalisé pour l'ADEME dans le cadre de l'appel à projets de R&D 2008 de l'ADEME « Performances Biomasse Énergie, le chauffage domestique » avec le soutien scientifique et financier du MEDDTL. Ce projet visait à identifier et caractériser les techniques et/ou les comportements permettant de réduire les émissions de polluants particuliers et gazeux dues à la combustion du bois dans le secteur domestique.

Coordonné par l'INERIS, il a rassemblé 12 partenaires :

- Centres d'études : CITEPA, CTIF, EIFER, INERIS,
- Industriels : Axis, APP, Chazelles, Poujoulat, Supra,
- Laboratoires Universitaires : LCME, LERMAB, LMSPC.

Il s'est articulé autour de 6 actions (cf. convention ADEME n°0801C0019), dont les objectifs ont été rappelés dans le rapport.

L'**action 1** a proposé une synthèse des connaissances sur les émissions des polluants dues à la combustion du bois et sur les techniques primaires et secondaires de réduction de ces émissions, disponibles commercialement (et/ou sans verrou technologique majeur). Elle a également permis de sélectionner quatre techniques de réduction secondaire testées pendant le projet.

L'objectif de l'**action 2** « Techniques et protocoles de mesurage » a été de déterminer la méthode de mesurage devant être utilisée dans PEREN²BOIS, de la qualifier et de la faire connaître. Les travaux réalisés sur le prélèvement de la fraction solide ont permis de proposer des modifications du protocole DIN+ initial notamment sur le contrôle et le maintien de la température du flux de gaz lors de la filtration à 125°C. Des essais d'intercomparaison de la méthode réalisés dans ces conditions sur trois plateformes d'essais ont donné des résultats satisfaisants (n=18, écart type de reproductibilité 34%, ce qui correspond, pour un intervalle de confiance à 95%, à une incertitude élargie de $\pm 68\%$). Le prélèvement de la fraction condensable par barbotage à l'isopropanol inspiré de la méthode EN TS 15439 : 2006 a été comparé avec succès avec la méthode US EPA 5H.

Cette méthode a donc été proposée à l'ADEME et au SER pour être testée sur un certain nombre d'appareils afin d'être prise en compte dans la détermination du taux de poussières dans le calcul de l'Indice Flamme Verte. Elle a d'autre part été proposée au CEN TC295 GT5 et initialement retenue parmi d'autres en tant que candidate pour la proposition d'une méthode pouvant être retenue à court terme. Les récents essais d'intercomparaison réalisés à SSC (Stazione sperimentale per i Combustibili, Italie) dans le cadre du CEN TC295 GT5 ont permis de mettre en évidence une bonne correspondance des résultats avec ceux de la méthode du tunnel à dilution (NS 3058-2) pour les 9 essais réalisés.

Les actions 3 et 4 ont eu pour objectifs de tester des techniques primaires et secondaires de réduction des émissions par la réalisation de campagnes de mesurage.

L'action 3 a consisté à évaluer l'influence des matériaux de construction et des systèmes de catalyse sur les émissions de polluants atmosphériques. Au niveau des matériaux de construction, le matériau réfractaire est dans l'ensemble celui présentant les meilleures performances environnementales (CO, HAP, masse de PM). En air primaire, la tendance inverse est observée pour les émissions de lévoglucosan puisque le réfractaire présente les émissions les plus élevées, ce qui n'est pas forcément contradictoire puisque littérature fait état d'une dépendance de la formation de levoglucosan avec la température de combustion pas forcément en accord avec la formation de particules ou de polluants. L'appareil en fonte a des performances très proches et un peu moins dépendant des conditions d'essai, une tendance similaire a, dans ce cas été observée, au niveau des résultats de lévoglucosan.

L'étude bibliographique critique réalisée sur les systèmes catalytiques existant ainsi que les tests réalisés sur deux systèmes catalytiques sélectionnés par les partenaires ont permis de formuler un certain nombre de recommandations relatives au positionnement de la technique catalytique vis-à-vis de l'appareil de chauffage, à la prise en compte des pertes de charges potentielles, aux conditions de températures nécessaires à l'activation du catalyseur. L'intégration du catalyseur directement dans le foyer permet en partie de répondre à ces problématiques mais pose d'autres problèmes tels que la durée de vie du système catalytique.

Les résultats des tests réalisés sur les techniques secondaires dans le cadre de l'action 4 ont montré l'électrofiltre R_ESP, positionné en bout de conduit, comme celle présentant le plus d'intérêt vis-à-vis de la réduction des polluants particulaires. Cependant, son manque d'efficacité vis-à-vis de la réduction des émissions de la fraction condensable des aérosols d'une part et la problématique de l'installation, de l'utilisation et de l'entretien d'un équipement sous haute tension dans les logements domestiques d'autre part, rend difficilement possible le déploiement d'une telle technique en France, à ce jour. Cette action a également permis de déterminer un certain nombre de facteurs d'émissions relatifs aux appareils de chauffage testés avec et sans la technique de réduction E_ESP, qui ont été comparés à ceux collectés dans le cadre de l'action 1.

L'action 5, relative à l'étude des indicateurs potentiels (levoglucosan, EC/OC) de l'efficacité des politiques de réduction des émissions a montré que si le lévoglucosan demeurerait un traceur incontournable pour quantifier l'influence de la combustion de biomasse notamment sur les pollutions particulaires, sa présence en phase gazeuse dans les rejets devrait être prise en compte pour évaluer les effets des dispositifs de réduction des émissions de particules par les appareils de chauffage au bois.

L'action 6, avait pour vocation de proposer d'une part des éléments visant à améliorer les conduites des utilisateurs dans le but d'optimiser l'utilisation des appareils de combustion au bois sur le plan énergétique et environnemental. Elle a permis de rédiger sept fiches de bonnes pratiques sur les thèmes suivants :

- La combustion du bois,
- Les polluants atmosphériques émis par la combustion du bois,
- Les techniques de réduction des polluants,
- Le combustible,

- L'appareil et son installation,
- L'allumage manuel,
- Fonctionnement et régimes de combustion.

Elle visait d'autre part à identifier les contraintes et les verrous associés à la mise en œuvre des techniques étudiées ainsi que les solutions pouvant être proposées pour y répondre. Les principales recommandations formulées à l'égard des industriels fabricants des systèmes de traitements portent sur l'intégrabilité du système à son environnement de fonctionnement. En effet, les systèmes doivent être facilement démontables pour permettre un entretien régulier (évacuées de manière continue ou périodique des poussières accumulées) et respecter l'obligation réglementaire de deux ramonages annuels. Les systèmes nécessitant la présence de haute tension ou la mise en pression d'une partie du conduit, nécessite une évolution de la législation en vigueur (présence de haute tension, mise en pression d'une partie du conduit pour certains filtres) pour encadrer l'autorisation de ces technologies en termes d'installation, d'utilisation et d'entretien.

Enfin des interrogations demeurent sur l'efficacité, la mise en œuvre et l'entretien de ces techniques sur le long terme, ce qui n'a pu être étudié. Il pourrait ainsi être intéressant d'étudier sur des périodes de plusieurs semaines ou plusieurs mois, le fonctionnement de ces techniques installées chez des particuliers. Une telle approche s'appuierait ainsi sur des conditions d'utilisation des appareils à combustibles plus représentatives du chauffage domestique et permettrait également de confronter les performances d'épuration et la fiabilité du dépoussiéreur à une utilisation prolongée dans le temps.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES, NORMATIVES ET REGLEMENTAIRES

- 1 Méthode allemande DIN+ de détermination de la fraction solide de l'aérosol émise par les appareils de chauffage domestique fonctionnant à la biomasse décrite dans EN TS 15883
- 2 Particulate Emissions from Biomass Combustion in IEA Countries, Survey on Measurements and Emission Factors, Thomas Nussbaumer, Claudia Czasch, Norbert Klippel, Linda Johansson, Claes Tullin, January 2008
- 3 Overview on Technologies for Biomass Combustion and Emission Levels of Particulate Matter, Thomas Nussbaumer, Zürich, June 2010
- 4 NF EN 13284-1 Emissions des sources fixes - Détermination de la faible concentration en masse de poussières – Partie 1 : méthode gravimétrique manuelle. (Mai 2002)
- 5 EN TS 15439 : 2006 Gazéification de biomasse-Goudron et particules dans le gaz combustible-échantillonnage et analyse
- 6 Norwegian standard NS 3058-2 June 1994, Enclosed wood heaters Smoke emission, Part 2: Determination of particulate emission
- 7 EN TS 15883 (TC 295) Residential solid fuel burning appliances - Emission test methods
- 8 NF EN 303-5 : Chaudières de chauffage – Partie 5 : Chaudières spéciales pour combustibles solides, à chargement manuel et automatique, puissance utile inférieure ou égale à 300 kW
- 9 NF EN 13 229 : Foyers ouverts et inserts à combustibles solides – Exigences et méthodes d'essai.
- 10 EN 13 240 : Poêles à combustibles solides – Exigences et méthodes d'essai.
- 11 EN 12815 : Cuisinières domestiques solides – Exigences et méthodes d'essai
- 12 EN 14 785 : Poêles à granulés – Exigences et méthodes d'essais
- 13 Emission reduction using the Schröder Hydrocube, experiments in a straw pellets fired small-scale combustion unit, presentation at the IEA Task 32 Workshop, E. Wopienka, Austrian BioEnergy Centre, 20th October 2008.
- 14 Reduction of fine particles emissions from residential wood combustion, Workshop in Kuopio on May 22-23, 2006, K. Hytönen, J. Jokiniemi (Eds.), May 2007
- 15 New developments in small scale ESP technology, H. Hartmann, P. Turowski, TFZ, 2008
- 16 Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen
- 17 Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
- 18 Emissionsminderung an kleinen Holzfeuerungsanlagen, C. Mainx, P. Neisecke, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Vorstellung am Februar 2009
- 19 INERIS - Données technico-économiques sur les substances chimiques en France, Dichlorométhane, J.M. Brignon, 2006

20 Survey on the present state of particle precipitation devices for residential biomass combustion with a nominal capacity up to 50 kW in IEA member states Bioenergy Task 32 member countries, final version, December 2011, Ingwald Obernberger, Graz Austria

21 <http://www.ecolinksolutions.com/ABCAT.html>

22 O2 ring, le filtre à particules de Palazzetti, pour chauffages à bois, article paru dans le [magazine bioénergie internationale n°16- novembre-décembre 2011](#)

23 HAP répertoriés Polluants Organiques Persistants (POP) par le protocole d'Aarhus de 1998 : B[a]P, B[b]F, B[k]F et IP

24 HAP à surveiller à l'émission selon la norme NF X 43-329 : B[a]A, B[k]F, B[b]F, B[a]P, Db[ah]A, IP, B[ghi]P et Fluoranthène

25 Amélioration des performances environnementales et de l'intégration dans l'habitat des équipements de chauffage domestique au bois - LERMAB, LGRE, SUPRA -31/07/2008

26 Mise au point d'un procédé de traitement catalytique des émissions issues du chauffage domestique au bois – LGRE, Fondis – Décembre 2007

27 Oros, D. R., Abas, M. R. b., Omar, N. Y. M. J., Rahman, N. A., Simoneit, B. R. T. (2006) Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning: Part 3. Grasses. Applied Geochemistry 21, 919-940

28 Oros, D. R., Simoneit, B. R. T. (2001) Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning Part 1. Temperate climate conifers. Applied Geochemistry 16, 1513-1544.

29 Oros, D. R., Simoneit, B. R. T. (2001) Identification and emission factors of molecular tracers in organic aerosols from biomass burning Part 2. Deciduous trees. Applied Geochemistry 16, 1545-1565.

30 Fine, P. M., Cass, G. R., Simoneit, B. R. T. (2002) Chemical Characterization of Fine Particle Emissions from the Fireplace Combustion of Woods Grown in the Southern United States. Environmental Science and Technology 36, 1442-1451.

31 Fine, P. M., Cass, G. R., Simoneit, B. R. T. (2001) Chemical Characterization of Fine Particle Emissions from Fireplace Combustion of Woods Grown in the Northeastern United States. Environmental Science & Technology 35, 2665-2675.

32 Engling, G., Herckes, P., Kreidenweis, S. M., Malm, W. C., Collett, J., Jeffrey L. (2006) Composition of the fine organic aerosol in Yosemite National Park during the 2002 Yosemite Aerosol Characterization Study. Atmospheric Environment 40, 2959-2972.

33 Simoneit, B. R. T., Schauer, J. J., Nolte, C. G., Oros, D. R., Elias, V. O., Fraser, M. P., Rogge, W. F., Cass, G. R. (1999) Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles. Atmospheric Environment 33, 173-182.

34 Fine, P. M., Cass, G. R., Simoneit, B. R. T. (2002) Chemical characterization of fine particle emissions from the fireplace combustion of woods grown in the Southern United States. Environmental Science & Technology 36, 1442-1451.

- 35 Fine, P. M., Cass, G. R., Simoneit, B. R. T. (2004) Chemical characterization of fine particle emissions from the fireplace combustion of wood types grown in the Midwestern and Western United States. *Environmental Engineering Science* 21, 387-409.
- 36 Fine, P. M., Cass, G. R., Simoneit, B. R. T. (2004) Chemical Characterization of Fine Particle Emissions from the Wood Stove Combustion of Prevalent United States Tree Species. *Environmental Engineering Science* 21, 705-721.
- 37 Schauer, J. J., Kleeman, M. J., Cass, G. R., Simoneit, B. R. T. (2001) Measurement of Emissions from Air Pollution Sources. 3. C1-C29 Organic Compounds from Fireplace Combustion of Wood. *Environmental Science & Technology* 35, 1716-1728
- 38 Fraser, M. P., Lakshmanan, K. (2000) Using levoglucosan as a molecular marker for the long-range transport of biomass combustion aerosols. *Environmental Science & Technology* 34, 4560-4564
- 39 Hoffmann, D., Tilgner, A., Iinuma, Y., Herrmann, H. (2010) Atmospheric Stability of Levoglucosan: A Detailed Laboratory and Modeling Study. *Environmental Science & Technology* 44, 694-699.
- 40 Favez, O., El Haddad, I. P., Christine, Boréave, A., Abidi, E., Marchand, N., Jaffrezou, J. L., Besombes, J. L., Personnaz, M. B., Sciare, J., Wortham, H., George, C., D'Anna, B. (2010) Inter-comparison of source apportionment models for the estimation of wood burning aerosols during wintertime in an Alpine city (Grenoble, France). *Atmospheric Chemistry and Physics* 10, 5295-5314.
- 41 Piot, C. (2011) Polluants atmosphériques organiques particulaire en Rhône-Alpes: caractérisation chimique et sources d'émissions. Université de Grenoble Chambéry.
- 42 Pissot, N. (2011) Estimation de l'impact du chauffage au bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur : analyse de traceurs organiques spécifiques de la combustion de la biomasse au sein de l'aérosol atmosphérique. Université de Grenoble.
- 43 Rapport INERIS DRC-07-82361-14586A, Étude exploratoire sur la présence des traceurs spécifiques de la source « combustion du bois » dans les grandes agglomérations françaises, AIRPARIF, ATMO Nord Pas de Calais, ASCOPARG ,ASPA, LCME, LGGE, INERIS, E.Leoz , Décembre 2007
- 44 Zdráhal, Z., Oliveira, J., Vermeylen, R., Claeys, M., Maenhaut, W. (2002) Improved method for quantifying levoglucosan and related monosaccharide anhydrides in atmospheric aerosols and application to samples from urban and tropical locations. *Environmental Science & Technology* 36, 747-753.
- 45 Nolte, C. G., Schauer, J. J., Cass, G. R., Simoneit, B. R. T. (2001) Highly Polar Organic Compounds Present in Wood Smoke and in the Ambient Atmosphere. *Environmental Science & Technology* 35, 1912-1919.

-
- 46 Rapport INERIS DRC-08-70801-15219A, Évaluation de l'impact des appareils de chauffage à bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur, Rapport final CITEPA, CSTB, INERIS, LCME, Contrat ADEME N°05 01 C 0066, 2008
- 47 Demirbas, A. (2007) The influence of temperature on the yields of compounds existing in bio-oils obtained from biomass samples via pyrolysis. *Fuel Processing Technology* 88, 591-597
- 48 Shafizadeh, F., (1984) The Chemistry of Pyrolysis and Combustion. In *The Chemistry of Solid Wood*, American Chemical Society: Vol. 207, 489-529.
- 49 Mazzoleni, L. R., Zielinska, B., Moosmuller, H. (2007) Emissions of Levoglucosan, Methoxy Phenols, and Organic Acids from Prescribed Burns, Laboratory Combustion of Wildland Fuels, and Residential Wood Combustion. *Environmental Science and Technology* 41, 2115-2122
- 50 Règlement sanitaire départemental (circulaire modifiée de 1978) ARTICLE 31.6
- 51 DTU 24.1 Travaux de fumisterie

6. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Produit de sortie : « Protocole simplifié de détermination de la fraction solide à 125°C des poussières totales émises par les appareils de chauffage domestique utilisant de la biomasse comme combustible solide »	7 A4
Annexe 2	« Fiches de bonnes pratiques, visant à limiter les émissions de poussières fines et de composés organiques, à destination des utilisateurs »,	15 A4

ANNEXE I

« Protocole simplifié de détermination de des poussières totales (fractions solide et condensable) émises par les appareils de chauffage domestique utilisant de la biomasse comme combustible solide »

METHODE D'ESSAI PROPOSEE

DESCRIPTIF

Ce protocole consiste en :

- Un prélèvement non isocinétique de la fraction solide sur filtre à une température de $125^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ mesurée et maintenue dans le flux,
- Un prélèvement de la fraction condensable par barbotage dans trois barboteurs placés en série et remplis d'isopropanol (IPA) de catégorie grade technique.
 - Le premier barboteur contient 150 ml d'IPA et est positionné dans un bain d'eau à $35-40^{\circ}\text{C}$;
 - Le second barboteur contient 100 ml d'IPA et est positionné dans un bain d'eau glacée ;
 - Le troisième barboteur contient 100 ml d'IPA et est positionné dans un bain d'eau à $15-20^{\circ}\text{C}$.

La température dans le flux à la sortie du troisième barboteur doit être maintenue à $20^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. Le schéma suivant illustre le principe de prélèvement de la méthode.

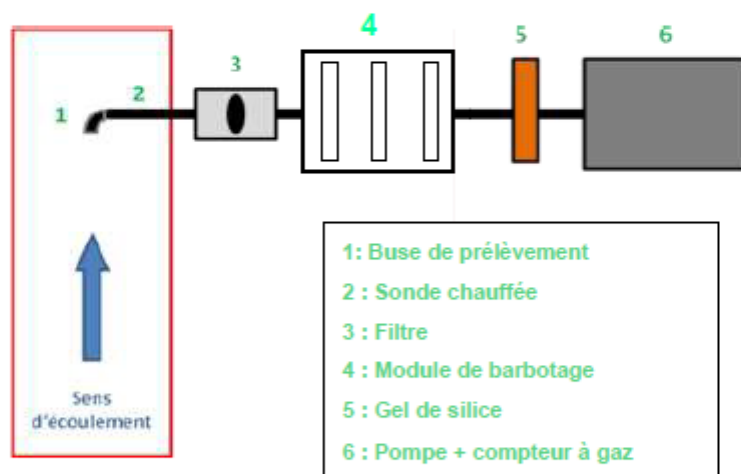


Figure 22 : Schéma de principe de la méthode de prélèvement proposée

PRINCIPE

Le prélèvement est réalisé dans les conditions de charge des appareils définies dans les normes en vigueur. Le prélèvement est assuré à l'aide d'une sonde coudée dont l'extrémité possède un orifice dont la section est perpendiculaire à l'écoulement du gaz dans la section de mesure. Lors du prélèvement, les gaz doivent entrer dans l'orifice dans le sens de l'écoulement.

Le dispositif de filtration contenant le média filtrant est situé en dehors du conduit, la longueur de la sonde en amont du filtre sera minimisée pour limiter les dépôts dans la sonde. Dans un but de simplification de la méthode de mesurage, le mesurage du profil de vitesse sur la section de mesurage ainsi que l'isocinétisme du prélèvement ne sont pas requis.

L'équipement de prélèvement doit être conçu de sorte que lors d'une période de prélèvement de 30 minutes, un volume d'effluent gazeux de $270 \pm 13,5$ litres est extrait selon les conditions normales (273 K, 1013 hPa). L'échantillonnage débute trois minutes après enfournement de la charge dans la chambre de combustion et la fermeture de la porte du foyer

La température est un paramètre fondamental pour garantir l'homogénéité des résultats d'un prélèvement à l'autre :

- Une température de prélèvement trop faible provoque la condensation d'une portion de l'aérosol. Cette condensation non maîtrisée entraîne une surestimation et une grande variabilité des résultats.
- Une température de prélèvement trop élevée entraîne une sous-estimation des résultats.

La température des gaz dans la sonde et dans le porte-filtre sera maintenue à $125^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

Pour effectuer le mesurage, l'orifice de la sonde de prélèvement est positionné au centre sur la section de mesurage. Le média filtrant est inséré dans un porte filtre positionné en sortie de la sonde de prélèvement.

Au début du prélèvement, un organe de réglage de type rotamètre ou équivalent doit permettre le réglage du débit de prélèvement. Le système de pompage et de mesurage du débit est précédé d'une cartouche contenant un agent desséchant pour protéger la pompe et permettre le mesurage du volume prélevé sur gaz sec.

L'équipement de prélèvement est composé principalement des éléments suivants :

- une buse d'entrée ;
- une sonde d'aspiration ;
- un dispositif de filtration ;
- une pompe ;
- un système de réglage du débit ;
- un dispositif de mesurage du volume de gaz échantillonné rejetant à la pression atmosphérique.

CARACTERISTIQUE DE L'EQUIPEMENT DE PRELEVEMENT

TRONÇON DE MESURAGE

Les caractéristiques du tronçon de mesurage sont définies dans les normes en vigueur. Le point de prélèvement des poussières doit être situé au dessus du point de mesurage de la pression statique, situé sur le tronçon normalisé, et à une distance de deux diamètres hydrauliques en dessous du débouché du conduit.

LA BUSE D'ENTREE

Le diamètre de la buse d'entrée doit être compris entre 9,5 et 10 mm. Afin de limiter les perturbations du flux de gaz à proximité de l'orifice de la buse, les prescriptions suivantes doivent être satisfaites :

- Le diamètre interne de la buse doit être constant sur une longueur d'au moins un diamètre intérieur depuis l'orifice de la buse.
- Les coudes sont autorisés uniquement lorsqu'ils sont placés après au moins 30 mm de section droite ; le rayon de courbure doit être d'au moins une fois et demie le diamètre interne.

LA SONDE D'ASPIRATION

La sonde de prélèvement doit être conçue pour les températures de gaz de combustion habituellement rencontrées.

Son diamètre doit être compris entre 8 et 10 mm.

Elle doit avoir une surface interne lisse et correctement polie et doit être conçue de façon à faciliter son examen et son nettoyage avant chaque utilisation (rinçage à l'eau).

Elle doit être isolée thermiquement, chauffée et régulée à 125°C +/- 10°C jusqu'au porte-filtre inclus.

Entre l'embout coudé de la sonde et le porte-filtre la portion doit être rectiligne et la distance être inférieure à 1 mètre afin de limiter les dépôts de poussière en amont du filtre.

PORTE-FILTRE

Le porte-filtre et les connexions à la canne doivent être conçus de façon à ce que le filtre ne puisse être endommagé lors de sa manipulation.

La température des gaz au niveau de la zone de filtration doit être régulée à 125°C +/- 10°C.

MEDIA FILTRANT

Le média filtrant consiste en un filtre plan ou un manchon filtrant, composé de fibres de verre ou de quartz ou de PTFE, adapté au porte-filtre et exempt de liants organiques. L'efficacité de collecte du filtre doit être supérieure à 99,5 % pour un aérosol d'un diamètre aérodynamique de particule moyen de 0,3 µm.

La stabilité mécanique de chaque type de média filtrant doit avoir été contrôlée après 30 minutes d'étuvage à 160°C. A cette température les médias filtrant ne doivent pas perdre plus de 2 mg en masse.

MODULE DE BARBOTAGE

Le module de barbotage est constitué de la manière suivante :

- Le premier barboteur contient 150 ml d'IPA et est positionné dans un bain d'eau à 35-40°C ;
- Le second barboteur contient 100 ml d'IPA et est positionné dans un bain d'eau glacée ;
- Le troisième barboteur contient 100 ml d'IPA et est positionné dans un bain d'eau à 15-20°C.

Le module de barbotage peut être placé au sol en connectant une ligne chauffée, maintenue à 125 +/- 10 °C entre le porte-filtre et le module de barbotage. Dans ce cas, pour compenser les risques d'évaporation de l'IPA contenu dans le premier barboteur, il pourra être nécessaire, de le remplir avec 200 ml d'IPA.

Il est également possible d'insérer un flexible non chauffé entre le porte-filtre et le module de barbotage :

- ce flexible devra alors être le plus court et le plus rectiligne possible de façon à limiter les pertes ;
- il devra être rincé 3 fois à l'IPA après chaque essai, le contenu du rinçât étant ajouté à celui du premier barboteur.

La température dans le flux à la sortie du troisième barboteur doit être maintenue à 20°C +/- 10°C.

POMPE

La ligne de prélèvement doit être équipée d'un système de condensation de l'humidité permettant de protéger la pompe et de déterminer le volume prélevé sur gaz sec.

DISPOSITIF DE MESURAGE DU VOLUME

Le dispositif de mesurage du volume doit être équipé d'un système de mesurage de la température des gaz pour ramener les teneurs mesurées aux conditions normales de température. Il conviendrait également de mesurer la pression atmosphérique pour ramener les teneurs mesurées aux conditions normales de pression.

PROTOCOLE

CONDITIONNEMENT ET PESEE DES MEDIAS FILTRANT

Avant le mesurage :

Le média filtrant doit être porté pendant 1h à 150°C (+5,-0) afin d'être séché et d'éliminer d'éventuels liants dont la perte pendant le prélèvement pourrait conduire à un biais de mesurage.

Il est ensuite refroidi à la température ambiante dans un dessiccateur pendant 4 h.

Le filtre extrait du dessiccateur est ensuite pesé immédiatement pour déterminer son poids sec à vide à l'aide d'une balance de résolution 0,1 mg. Il est recommandé de suivre les consignes suivantes :

- Vérifier la balance par rapport à des masses étalon ;
- Consigner les conditions climatiques du local.

Le média filtrant est ensuite conservé à l'abri de l'air ou dans le dessiccateur jusqu'au moment du mesurage.

Positionner le média filtrant en veillant à ne pas l'endommager et à exclure tout passage de poussière vers la pompe. Le filtre est placé dans le porte-filtre.

Après le mesurage :

Le média filtrant doit être séché pendant 30 min à 120°C (+5,-0). Il est ensuite refroidi à la température ambiante dans un dessiccateur pendant 4 h. Le manchon extrait du dessiccateur est ensuite pesé immédiatement pour déterminer sa masse avec la poussière, ce qui permet, par différence avec la masse du média avant prélèvement, de déterminer la masse de poussière.

ANALYSE DU CONTENU DES BARBOTEURS APRES LE MESURAGE:

L'IPA contenu dans les barboteurs est versé dans un flacon nommé « I ». Les trois barboteurs sont rincés trois fois à l'IPA. Les rinçats sont versés dans le flacon nommé « I »

- Procédure flacon « I »
 - Peser un bécher de 100 ml avec une balance de précision 0,1 mg,
 - Verser le contenu du flacon « I » dans un grand cristalliseur plat,
 - Laisser l'IPA s'évaporer à température ambiante sous hotte,
 - Lorsque la quasi totalité de l'IPA est évaporé, rincer trois fois avec 20 ml d'IPA et verser dans le bécher de 100 ml préalablement pesé,
 - Laisser évaporer à sec à température ambiante sous hotte.

Passer au dessiccateur 24h et peser avec une précision de 0,1 mg.

CONTROLE D'ETANCHEITE DE L'EQUIPEMENT

L'équipement est assemblé et son étanchéité contrôlée. Ce contrôle est réalisé en obturant la buse d'entrée et en mettant en marche le dispositif d'aspiration.

Le débit de fuite peut être mesuré au moyen d'un rotamètre en sortie du dispositif de mesurage de débit. Le débit de fuite doit être inférieur à 2 % du débit de prélèvement. S'il est supérieur, la fuite doit être identifiée, et colmatée avant démarrage des essais.

Il est également possible de vérifier l'absence de fuites en cours d'essai par un mesurage en continu de la concentration en oxygène directement dans le conduit et en aval de l'équipement ; ce contrôle n'est qu'indicatif et ne permet pas de quantifier précisément le débit de fuite.

BLANC DE SITE

Pour chaque série de prélèvement, un blanc de site doit être réalisé. Un blanc de site est constitué d'un filtre et d'une certaine quantité d'IPA.

Le filtre est préparé puis transporté sur site dans les mêmes conditions que ceux destinés à l'échantillonnage. Le montage est préparé, le blanc de site est installé dans le porte-filtre puis retiré et rangé dans une boîte de transport adaptée. Chaque barboteur est rempli d'IPA comme indiqué en 0.

L'ensemble fait l'objet d'un démontage. Les barboteurs sont vidés et rincés comme indiqué en 0.

Chaque constituant du blanc de site subit par la suite le même traitement que les échantillons.

CALCUL

La concentration (mg/m_0^3) de la fraction solide correspond à la masse collectée sur le filtre, divisée par le volume de gaz prélevé ramené aux conditions normales de pression et de température (273 K, 1013 Pa) et à la teneur en oxygène de 13%.

La concentration (mg/m_0^3) de la fraction condensable correspond à la masse collectée dans les barboteurs, divisée par le volume prélevé ramené aux conditions normales de pression et de température (273 K, 1013 Pa) et à la teneur en oxygène de 13%.

$$C = m / V_0 \cdot f_o$$

Où :

- m est la masse de poussière collectée sur le filtre ou la masse collectée dans les barboteurs
- V_0 est le volume prélevé ramené aux conditions normales de pression et de température :

$$V_0 = V_{\text{mesuré au compteur}} (\text{m}^3) \times \frac{273 \times P_{\text{atmosphérique}} (\text{hPa})}{(273 + T_{\text{mesurée au compteur}} (^{\circ}\text{C})) \times 1013}$$

- f_o est le facteur de correction permettant de ramener la teneur mesurée à la teneur en oxygène de référence d'O₂ (13%)

$$f_o = (21-13) / (21-O_{2\text{mesuré}})$$

La quantité totale de l'aérosol émis correspond à la somme des concentrations de la fraction solide et de la fraction condensable.

ANNEXE II

« Fiches de bonnes pratiques, visant à limiter les émissions de poussières fines et de composés organiques, à destination des utilisateurs »



**PEREN²BOIS : EVALUATION TECHNICO-ECONOMIQUE DES
PERFORMANCES ENERGETIQUES ET ENVIRONNEMENTALES
DES MEILLEURES TECHNIQUES DISPONIBLES DE
REDUCTION DES EMISSIONS DE POUSSIÈRES FINES ET DE
COMPOSES ORGANIQUES POUR LES APPAREILS DE
COMBUSTION DOMESTIQUE UTILISANT LA BIOMASSE.**

Produit de sortie Action 6.2 Fiches de bonnes pratiques, visant à limiter les
émissions de poussières fines et de composés organiques, à destination des
utilisateurs

**PEREN²BOIS: TECHNO-ECONOMICAL EVALUATION OF THE
ENERGETIC AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF THE
BEST AVAILABLE TECHNOLOGIES FOR REDUCING FINE
PARTICLE AND ORGANIC COMPOUND EMISSIONS FROM
DOMESTIC COMBUSTION DEVICES USING BIOMASS**

Deliverable Action 6.2 Sheets of good practice for users aiming at reducing fine
particle and organic compound emissions

Date 27/01/2011

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par les 13 partenaires cités dans la convention
n° 0801C0019-Coordination du projet INERIS

COORDINATION TECHNIQUE : Erwan AUTRET et Florence PROHARAM - Département
Bio-ressources – Direction des Energies Renouvelables, des Réseaux et des Marchés
Énergétiques, ADEME Angers

Auteurs : L. Robert (Poujoulat CERIC), J. Landreau (Poujoulat, CERIC), T. Mallereau
(Chazelles), M.L. Rabot Querci (Supra), M. Bondot (Axis)

Relecteurs : S. Bachellez (CTIF), J.L. Besombes (LCME), S. Collet (INERIS),
E.Deflorenne (CITEPA), I. Fraboulet (INERIS), A. Kiennemann (LMSPC), C.
Rogaume (LERMAB), F. Tabet (EIFER).

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

L'ADEME en bref

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

www.ademe.fr

ACTION 6 : PEREN²BOIS

Recommandations aux particuliers – **bonnes pratiques visant à limiter les émissions de particules (poussières)**

Dans le cadre du projet PEREN²BOIS, financé par l'ADEME, ayant pour objectif d'identifier et de caractériser les techniques et/ou les comportements permettant de réduire les émissions de polluants particulaires et gazeux issues des appareils de combustion domestique utilisant la biomasse, des fiches de bonnes pratiques ont été rédigées à destination des utilisateurs de ces appareils de combustion. En effet, lors d'une combustion du bois, les fumées émises sont composées d'un grand nombre de particules. Ces particules, et surtout celles présentant un diamètre inférieur à 10 µm (PM10), peuvent être nocives pour notre santé. Ces particules se retrouvent en concentration élevée certains jours de grand froid dans l'atmosphère, mais aussi dans l'air de nos habitations. Cependant, à l'aide de bonnes pratiques, il est possible de diminuer cette quantité de particules rejetées.

Liste des fiches :

Fiche 1 : La combustion du bois

Fiche 2 : Les polluants atmosphériques émis par la combustion du bois

Fiche 3 : Les techniques de réductions des polluants

Fiche 4 : Le combustible

Fiche 5 : L'appareil et son installation

Fiche 6 : L'allumage manuel

Fiche 7 : fonctionnement et régimes de combustion

Fiche 1 : La combustion du bois

Qu'est-ce que la combustion du bois ?

Pour que la combustion se produise, il faut : un combustible (le bois), un comburant (l'oxygène de l'air) et une flamme (l'allumette)

C'est une réaction chimique d'oxydation :

bois + air $\rightarrow$ CO₂ + H₂O + dégagement de chaleur

Elle produit essentiellement :

- un dégagement de chaleur ;
- des gaz, essentiellement du dioxyde de carbone (CO₂) et de la vapeur d'eau (H₂O) ;
- des résidus solides (cendres et poussières).



La combustion du bois se fait en trois phases :

- 1- Le séchage : l'augmentation de la température entraîne un processus de séchage.
- 2- La gazéification : lorsque le bois atteint une température supérieure à 300°C, des gaz se libèrent et s'enflamment (l'oxydation des gaz) : c'est la combustion vive ou homogène. Lors d'une combustion, environ 80 % de la masse de bois brûle de cette façon. Ces phases sont caractérisées par la présence de flammes dans le foyer.
- 3- La combustion du résidu charbonneux : Lorsque les dégagements de gaz se raréfient, l'oxygène réagit avec le charbon résiduel : c'est la combustion lente ou hétérogène, à ce stade, il ne reste plus que des braises dans le foyer.

Globalement la combustion fait intervenir plusieurs phénomènes :



Des phénomènes thermiques :
séchage, échange de chaleur



Des phénomènes thermodynamiques :
énergie et vitesse de réaction



Des phénomènes chimiques :
oxydation, transformations et
interactions de composés chimiques



Des phénomènes de mécanique des
fluides : gestion des écoulements, turbulence
au sein de la chambre

Fiche 2 : Les polluants atmosphériques émis par la combustion du bois

La combustion domestique du bois est responsable de l'émission d'un certain nombre de polluants atmosphériques présents, selon la température des fumées, en phases gazeuse, liquide et solide. Ces émissions doivent être prises en compte puisqu'elles contribuent à l'air ambiant que nous respirons.

Pourquoi ?

La raison principale aux émissions de polluants lors de la combustion du bois est souvent la mauvaise exploitation de l'appareil de combustion :

- ⇒ une quantité de bois non adaptée à la taille du foyer,
- ⇒ un mauvais allumage,
- ⇒ l'utilisation de bois insuffisamment séché,
- ⇒ la fermeture inappropriée de l'arrivée d'air.

Parmi les gaz émis :

- certains sont les produits d'une combustion incomplète comme le monoxyde de carbone (CO) et les composés organiques volatils (COV). A noter que les émissions de CO issues des appareils de chauffage domestique à bois sont prises en compte, au même titre que le rendement dans la détermination de l'indice de qualité du label Flamme Verte (voir Fiche 5).
- les autres sont principalement les Oxydes d'azote (NO_x) et les Oxydes de soufre (SO_x).

Les matières liquides et solides émises sont présentes en suspension dans l'atmosphère sous forme d'aérosols. On parle de particules, dont la taille est directement liée à leur impact sur la santé humaine.

Attention : La combustion inappropriée de déchets, de bois traités provoque l'émission de substances toxiques telles que les dioxines. Cette pratique est donc à exclure (voir Fiche 4)

Les particules fines sont composées de particules et de gouttelettes de taille inférieure à 10 millièmes de millimètre (diamètre <10 µm) qui restent longtemps en suspension dans l'atmosphère. Leur taille leur permet de pénétrer le système respiratoire. Plus les particules sont fines, plus elles sont susceptibles d'être véhiculées en profondeur dans le système respiratoire. A noter que, la combustion du bois est principalement émettrice de particules très fines (diamètre < 1 µm).

Elles peuvent présenter les effets suivant sur la santé :

- Irritation des yeux et des voies respiratoires,
- Diminution de la résistance et vulnérabilité accrue face aux refroidissements, bronchites et pneumonies.

Les particules présentent un impact sanitaire de par leur nature même, tout d'abord, mais aussi de par la nature des espèces chimiques potentiellement toxiques tels que les HAP et les métaux lourds qu'elles sont susceptibles de transporter.

Les particules ont plusieurs origines et sont de natures différentes :

- particules de cendres, particules de combustible non brûlé, particules de charbon de bois présentes dans le foyer et entraînées par les fumées ;
- particules émises par le processus de combustion constituées de sels minéraux, d'oxydes métalliques, ainsi que de métaux lourds ; et de imbrûlés composés de suies et d'hydrocarbures lourds condensés (goudrons).

A retenir :

- La combustion domestique du bois est responsable de l'émission d'un certain nombre de polluants atmosphériques. Certains de ces polluants comme le CO, les COV, les HAP et les poussières fines sont émis lorsque la combustion est mal maîtrisée.
- Les émissions de CO issues des appareils de chauffage domestique à bois sont prises en compte, au même titre que le rendement dans la détermination de l'indice flamme verte.
- Afin de limiter ces émissions il est nécessaire de combiner l'utilisation d'un appareil performant, avec du bois de chauffage bien sec et un réglage optimisé de l'appareil.
- La combustion inappropriée de déchets, de bois traités provoque l'émission de substances toxiques telles que les dioxines. Cette pratique est à exclure

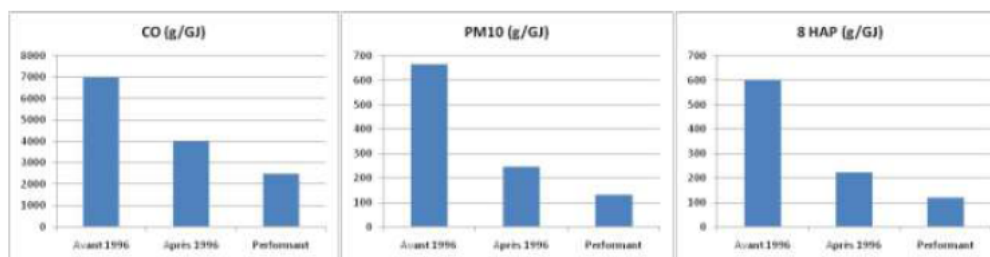
Fiche 3 : Les techniques de réductions des polluants

Il existe deux possibilités d'agir sur les émissions de polluants :

- La maîtrise de la combustion ;
- La mise en œuvre de systèmes de traitement des fumées ;

La maîtrise de la combustion

L'évolution de la technicité des appareils de combustion au bois a déjà permis des améliorations conséquentes en termes de qualité de combustion et a de ce fait conduit à la réduction des émissions de polluants. Par exemple, un poêle ou un insert d'une génération antérieure à 1996 émettait près de 3 fois plus de monoxyde de carbone et 5 fois plus de particules fines et de HAP qu'un appareil performant actuel (rapport CITEPA - Peren).



Le marché actuel s'oriente vers l'amélioration de ces performances (au travers du label Flamme Verte par exemple, voir Fiche 5) et nous pouvons espérer pour les années à venir un chauffage au bois de plus en plus performant et propre. Ceci est rendu possible grâce à des évolutions techniques permettant d'optimiser les règles de la combustion.

La mise en œuvre de systèmes de traitement de fumées :

Les systèmes de traitement de fumées : technologies à l'étude

Les électrofiltres

Placée dans l'axe du conduit de fumées (en sortie d'appareil ou sur le toit), une électrode charge électriquement des particules qui viennent se coller à une électrode réceptrice par effet électrostatique.

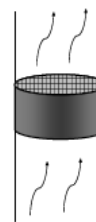
Ce système implique l'utilisation de courant continu Haute Tension (20 à 40kV).



Les catalyseurs

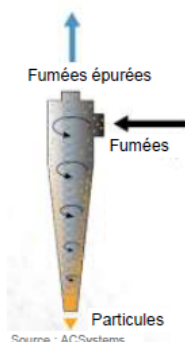
Sous l'effet de la chaleur, le filtre catalytique permet l'oxydation des goudrons ainsi que le monoxyde de carbone présents dans les fumées en CO₂.

Par effet mécanique, certaines particules sont également captées par le filtre.



Les cyclones

Les fumées sont accélérées en entrée de cyclone ce qui permet une séparation entre les gaz et les poussières par effet centrifuge.



Source : ACSystems

Remarque générale :

A l'heure actuelle :

- ces systèmes impliquent un entretien régulier.
- certaines contraintes relatives à leur mise en œuvre s'avèrent difficilement compatibles avec la législation française (génération de pertes de charges importantes nécessitant l'assistance d'un extracteur pour l'évacuation des fumées, présence de haut voltage dans le domestique, etc).

A retenir :

A l'heure actuelle le moyen le plus efficace d'obtenir de faibles taux d'émissions demeure la maîtrise de la combustion. Celle-ci passe par l'utilisation d'appareils de combustion performants, d'un combustible adapté associée à des pratiques en accord avec les recommandations des constructeurs

Fiche 4 : Le combustible

Pour les usages domestiques, les formes d'utilisation les plus fréquentes du bois sont la bûche et le granulé ; la forme à utiliser dépend du foyer disponible :

	Bûches		Bûches de bois densifiées ou « briquettes »	Granulés de bois ou « pellets »
Combustible				
Composition	Bois avec ou sans son écorce, en rondins ou quartiers		Bois feuillus ou résineux sans additif ou additif naturel <2%	Bois résineux ou feuillus sans additif ou additif naturel <2%
Conditionnement	Vrac, palette, ballot		Sac	Vrac, big bag, réservoir, sac
Humidité	15 - 20% (sec)	50-60 % (juste coupé)	<10%	<10%
Type de consommation	Prêt à l'emploi	Séchage 1-2 ans avant utilisation	Prêt à l'emploi	Prêt à l'emploi

Dans les appareils à bois, les poêles et les cheminées, il est impératif de brûler exclusivement du bois à l'état naturel. Il existe une certification « NF » garante de la qualité des combustibles : **NF 444 Biocombustibles solides (bois de chauffage, brique et granulés)**. La combustion de déchets de bois, de vieux bois, de palettes, de déchets et autres, non seulement est illicite et endommage votre installation, mais rejette en outre, de grandes quantités de polluants pouvant nuire à la santé.

L'humidité et la taille du combustible jouent un rôle important sur les émissions polluantes et particulièrement les poussières. Il est donc important de brûler des bûches sèches et préalablement fendues (ayant un diamètre de 10 cm environ). Un temps de séchage du bois de deux ans dans un endroit sec et ventilé s'avère nécessaire.

Préférez des bûches adaptées à la taille de votre foyer, des bûches de trop grandes dimensions sont moins en contact avec l'air comburant et leur combustion émet un fort taux de particules.

Pratiques à exclure :

Déchets de bois, agglomérés, contreplaqués, palettes, emballages, papiers, cartons	Dimensions non adaptées au foyer	Bois non prêt à l'emploi : bûches non sèches ou de section trop importante.
 Source : CERIC	 Source : Cheminées de Chazelles	 Source : CERIC

Quel type de bois faut-il utiliser : résineux ou feuillus ?

Les **feuillus durs** (chêne, hêtre, frêne, châtaignier, charme, noyer, fruitiers, etc.) sont plus appréciés pour l'approvisionnement des appareils de chauffage domestique à bûches.

Les **résineux et feuillus tendres** (épicéa, sapin, pin, mélèze, peuplier, saule, etc.) conviennent davantage à des usages professionnels car ils brûlent plus vite et dégagent ainsi rapidement la chaleur. Ce sont également d'excellents allume-feu pour l'appareil de chauffage au bois. Communément, les granulés sont composés de résineux tout comme certaines bûches densifiées.

L'essence : le contenu énergétique des résineux et des feuillus est sensiblement le même à l'état anhydre (sans présence d'eau dans le bois), il est en moyenne de : 5,3 kWh/kg pour les résineux et 5,1 kWh/kg pour les feuillus. (à 20% d'humidité, leur pouvoir calorifique est respectivement de 4,1 kWh/kg et 4,0 kWh/kg) Donc des bois sec, feuillus ou résineux, apportent quasiment la même quantité d'énergie.

L'humidité du combustible : un paramètre important pour la qualité de combustion

Le critère de l'humidité est essentiel car il intervient directement sur le contenu énergétique. Entre un bois sec prêt à l'emploi (moins de 20 % d'humidité rapportée à la masse brute) et un bois fraîchement coupé (55 % d'humidité rapportée à la masse brute), le pouvoir calorifique est deux fois moindre ! De plus, l'utilisation d'un bois humide abaisse le rendement des appareils. Il vous faudra donc en consommer davantage pour un confort équivalent.

A retenir :

Un bon bois de chauffage est un bois "propre" et sec. Il existe une certification « NF » garante de la qualité des combustibles : NF 444 Biocombustibles solides (bois de chauffage, brique et granulés).

La combustion inappropriée de déchets, de bois traités provoque l'émission de substances toxiques telles que les dioxines. Cette pratique est à exclure

Fiche 5 : L'appareil et son installation

Parmi les plus fréquents des appareils indépendants de chauffage au bois utilisés, on trouve :

- La cheminée à foyer ouvert utilise une grande quantité d'air (variant suivant la taille) ce qui refroidit considérablement la température dans l'âtre, et est à l'origine d'une combustion incomplète plus émissive de poussières et de plus faible rendement que d'autres appareils à allure et combustibles égaux.
- L'insert ou le foyer fermé ainsi que le poêle à bois permettent d'obtenir une bonne qualité de combustion et de limiter les émissions de particules, en respectant le plus possible le principe des 4 T : Température, Teneur en oxygène, Turbulence et Temps de séjour.
- Les chaudières qui permettent de produire de l'eau chaude.

Information : La règle des 4 T



La température

Il est important de maintenir une température des gaz suffisamment élevée et homogène à l'intérieur de la chambre de combustion dans toutes les parties de l'appareil pour éviter la présence de zones froides et faciliter une bonne combustion.



La teneur en oxygène

Il est important d'apporter suffisamment d'oxygène pour recueillir le maximum de chaleur. L'apport d'air peut se faire en différents endroits dans la chambre de combustion : Au niveau et au dessus du combustible.



La turbulence

Pour que la combustion puisse avoir lieu il est primordial que le combustible (le bois) et le comburant (l'air) soient en contact intime. La turbulence au sein de la chambre de combustion va permettre de favoriser ce contact.



Le temps de séjour

Les réactions de combustion sont rapides, cependant, elles nécessitent tout de même une durée de séjour des gaz libérés par le bois, de quelques secondes dans la chambre de combustion.

Les appareils et leurs performances :

Appareil	Cheminée ouverte		Insert et foyer fermés			Poêle			Chaudière		
	Bûches +	Briquettes	Bûches +	Briquettes	ou granulés	Bûches +	Briquettes	ou granulés	Bûches +	Briquettes	ou granulés
Type de combustible											
Type de chauffage	Air		Air ou eau chaude			Air ou eau chaude			Eau chaude		
Rendement appareils récents performants	< 20%		70 - 85%			70 - 85%			70 - 85%		
Emissions de polluants	Elevée		Faible			Faible			Faible		
Rendement appareils anciens ou peu performants	< 10%		30 - 50%			40 - 50%			40 - 50%		
Emissions de polluants	Elevée		Modérée			Modérée			Modérée		

Information : De nombreux efforts ont été menés ces dernières années par les fabricants pour proposer des solutions visant à augmenter le rendement et à diminuer les émissions polluantes, notamment les poussières. Les moyens qu'ils ont mis en œuvre sont principalement l'amélioration notable de la gestion de l'air et utilisation de matériaux réfractaires.



Afin de garantir une exploitation adéquate de l'appareil, un rendement élevé et des émissions faibles un label a été mis en place avec le concours de l'ADEME. Il s'agit du label Flamme verte qui a pour objectif de qualifier et d'identifier les appareils les plus performants et respectueux de la qualité de l'air et de fournir ainsi une information claire aux consommateurs.

Pour plus de renseignements : www.flammeverte.org

Entretien :

Dans tous les cas, il faut suivre les recommandations des fabricants d'appareils. De manière générale, les points suivants sont à respecter :

- Retirer régulièrement les cendres du foyer de façon à éliminer les résidus qui peuvent obstruer partiellement les trous d'admission d'air.
- Vider fréquemment le cendrier de l'appareil.
- Remplacer tout élément brisé ou fendu dès l'apparition du défaut.
- Effectuer le ramonage des conduits deux fois par an (dont une pendant la saison de chauffe) comme le précise la réglementation. Il doit être effectué par une entreprise qualifiée qui remettra à l'utilisateur, après intervention, un certificat de ramonage. Attention, seul le ramonage mécanique est reconnu (les bûches de ramonage ne font que faciliter le ramonage mécanique mais ne dispensent en aucun cas cette opération).
- Vérifier l'état des joints.
- Vérifier la bonne fermeture de la porte et du cendrier.
- Vérifier le bon fonctionnement des éléments mécaniques mobiles.

A retenir :

- Lors de l'installation d'un nouvel appareil, il est primordial de se référer aux conseils de l'installateur et à la notice d'utilisation fournie par le fabricant de l'appareil.
- Il est préférable de mettre en œuvre un appareil fonctionnant porte fermée (poêle ou insert) à une cheminée à foyer ouvert
- Attention à ne pas surdimensionner la puissance de l'appareil.

Fiche 6 : L'allumage manuel

L'allumage du feu est la phase qui peut être la plus polluante si elle est mal gérée, quel que soit l'appareil.

Un allumage et une pose du bois convenables sont essentiels au bon fonctionnement des foyers à bois et des cheminées.

- Pour un allumage respectueux de l'environnement, avec faibles émissions particulières, **préparer quelques morceaux de bois secs en résineux (7 à 8 unités) de très faible section, par exemple 2 x 3 cm.**
- Préparer ensuite la charge de bois préconisée par le fabricant, en essayant le plus possible de **maintenir une longueur de bûches adaptée à la surface de combustion.** Ne pas surcharger l'appareil, c'est inutile et dégrade la qualité de combustion !
- Déposer la charge de bois sur la surface de combustion, en vous assurant de croiser les bûches (empilage).
- Veiller à ce que les bûches de petit diamètre se trouvent sur la partie supérieure du module et par extension les plus grosses en dessous.
- Vérifier que les consignes du fabricant soient bien respectées, notamment les positions des différents registres de combustion et volet de tirage. (Registre d'air primaire et secondaire, volet de tirage, etc.)
- **Entrecroiser maintenant les bois d'allumage sur la pile de bois.** Insérer un cube d'allumage prévu à cet effet entre les morceaux de bois secs et allumer le.
- Fermer la porte. Il peut être conseillé de maintenir la porte entrouverte quelques minutes pour favoriser le début de combustion.

			
Bûches et bois d'allumage en place, prêts à être enflammés	Allumage de l'allume feu sur le dessus de l'empilage	Après 10 minutes les flammes ont progressé, avec peu de dégagement de fumée	Après 20 minutes, le feu est intense

Les avantages de cette démarche :

Cette démarche peu contraignante a 3 avantages importants :

- La chambre de combustion monte en température avant que la gazéification et la combustion des bûches démarrent or une température de chambre de combustion élevée permet de minimiser les émissions polluantes.
- Les bûches se réchauffent et finissent de se sécher (puisqu'elles ont encore 15% à 20% d'humidité même quand elles sont mises dans la chambre de combustion).
- Quand la gazéification et la combustion des bûches commencent, les gaz organiques volatiles qui se dégagent sont brûlés par les flammes, permettant de récupérer l'énergie de ces gaz et de ne pas polluer en les laissant s'échapper par le conduit.

A retenir :

- La période d'allumage doit durer au moins 10 minutes avant de ne baisser progressivement les apports d'air au niveau du foyer.
- Éviter les produits allume-feu à base de produits pétroliers
- Éviter de remplir le foyer

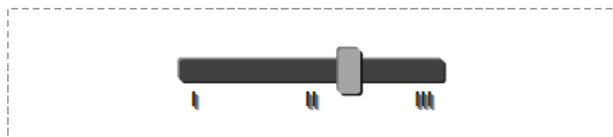
Fiche 7 : fonctionnement et régimes de combustion

Les réglages de l'appareil ont toute leur importance dans le processus de combustion du bois. En effet ce sont eux qui vont permettre d'apporter l'air nécessaire au bon mélange avec les gaz (en quantité suffisante et aux endroits appropriés). Ce sont aussi eux qui vont permettre de restituer la chaleur tout en garantissant à la combustion des températures suffisantes.

Il est donc très important de suivre les recommandations du fabricant pour ce qui est de la charge de bois adaptée à l'appareil (masse, dimensions, qualité), ainsi que celles concernant les réglages d'air et l'allumage.

Différentes allures et impact sur les émissions de poussières :

Les appareils permettent souvent trois réglages d'air qui conditionnent les régimes de combustion :



- **Allumage :** l'admission d'air est à son maximum. Ce réglage ne doit pas être utilisé en continu. En effet, ceci aurait pour conséquence d'augmenter la puissance instantanée de l'appareil au-delà de ses capacités, ce qui le détériorerait précipitamment.
- **Allure nominale :** cette allure permet d'atteindre la puissance définie par le constructeur (avec la charge de combustible qu'il préconise). C'est généralement le réglage qui permet d'avoir le meilleur rendement de l'appareil et les émissions les plus faibles.
- **Allure réduite :** cette allure provoque des émissions plus importantes avec des températures de fumées plus faibles. La vitre sera noircie plus rapidement et un fonctionnement prolongé dans ce mode encrasse plus rapidement les conduits (phénomène de bistrage).

Recharge :

Tout comme la phase d'allumage, le rechargement en combustible détermine la qualité de la combustion. Un rechargement réalisé trop tôt provoque un mélange air/gaz déséquilibré et donc une combustion incomplète. Un rechargement réalisé trop tard, ne permet pas d'enflammer la bûche correctement. Le moment propice se situe lorsque les flammes disparaissent au profit de la braise.

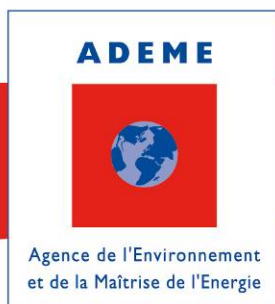
Bibliographie

1. **Guide pratique « se chauffer au bois de manière efficace et respectueuse de l'environnement »** - E. KARLSVIK, SINTEF et H. ORAVAINEN.
2. **Charte de qualité « Flamme Verte » : Appareils de chauffage indépendants au bois.** Version 2011 – ADEME, SER.
3. **La combustion de la biomasse – POLLUTION ATMOSPHERIQUE – MARS 2009** - Y. ROGAUME
4. **Présentation OPAIR 2007** – C. SCHWAB
5. **Energie-bois suisse : allumage le bon départ**
6. **OFEN** : Office Fédéral de l'Energie : Chauffage au bois et poussières fines, quelques conseils pour limiter les émissions.
7. **International biomass conference in Leipzig: User and fuel impacts on the emission of a chimney stove.** 24 mai 2011 : C. SCHÖN, H. HARTMANN, P. TUROWSKI
8. **Évaluation de l'impact des appareils de chauffage à bois sur la qualité de l'air intérieur et extérieur.** Rapport final INERIS (2008) INERIS, LCME, CITEPA et CSTB. –
9. **Référentiel NF 444 : Biocombustibles solides** (version 1 du 18/11/2010)

L'ADEME EN BREF

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

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

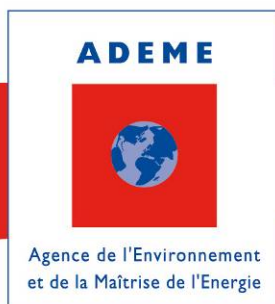


ABOUT ADEME

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

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

www.ademe.fr.



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

www.ademe.fr