Pollution atmosphérique
ISSN : 2268-3798
Éditeur : Association pour la Prévention de la Pollution Atmosphérique

236 | 2018
Varia

Influence de pratiques réelles d'utilisations sur les émissions d'un appareil de chauffage domestique au bois

Impact of real uses on the emissions of firewood stoves

Benoît Brandelet, Christophe Rose, Julien Landreau, Caroline Rogaume, Lionel Druette et Yann Rogaume

https://www.peren-revues.fr/pollutionatmospherique/6482

DOI : 10.4267/pollution-atmospherique.6482

Référence électronique
Benoît Brandelet, Christophe Rose, Julien Landreau, Caroline Rogaume, Lionel Druette et Yann Rogaume, « Influence de pratiques réelles d'utilisations sur les émissions d'un appareil de chauffage domestique au bois », *Pollution atmosphérique* [En ligne], 236 | 2018, mis en ligne le 15 septembre 2018, consulté le 27 février 2026. URL : https://www.peren-revues.fr/pollutionatmospherique/6482

Droits d'auteur
CC-BY

Influence de pratiques réelles d'utilisations sur les émissions d'un appareil de chauffage domestique au bois

Impact of real uses on the emissions of firewood stoves

Benoît Brandelet, Christophe Rose, Julien Landreau, Caroline Rogaume, Lionel Druette et Yann Rogaume

PLAN

1. Introduction
2. Matériels et méthodes
   2.1. Poêle à bois, combustible et procédure expérimentale
   2.2. Prélèvement et analyse
   2.2.1. Mesures physiques et analyses des gaz
      2.2.2. Prélèvement et analyses des particules
3. Résultats et discussions
   3.1. Résultats de la phase 1 de l'étude : identification des paramètres majeurs
   3.2. Zoom sur l'impact de l'écorce
   3.3. Zoom sur l'impact de l'humidité
   3.4. Zoom sur le mode d'allumage
4. Conclusion

TEXTE

1. Introduction

1 La transition énergétique est plus que jamais soutenue, notamment depuis l'accord de la COP21. Saidur *et al.* (2011) ont démontré que le chauffage domestique au bois est la première énergie renouvelable au monde et, de plus, la plus promue par les gouvernements. Le chauffage domestique au bois bûches est l'énergie la moins chère du marché, comme l'ont démontré Kalt et Kranzl (2011). Le chauffage domestique au bois présente ainsi de nombreux avantages : c'est une énergie renouvelable dans la mesure où sa ressource est gérée de manière durable, et elle crée le plus d'emplois locaux par unité d'énergie produite. Néanmoins, de nombreuses études démontrent

que le chauffage domestique au bois est une source importante d'émission de particules (Glasius *et al.*, 2006 ; Illerup et Nielsen, 2004 ; Johansson *et al.*, 2004 ; McDonald *et al.*, 2000). L'étude bibliographique de Vicente et Alves (2018) met clairement en évidence la densité des travaux démontrant la problématique des émissions de particules liées à la combustion de biomasse dans les appareils domestiques, avec une responsabilité, selon Karagulian *et al.*, d'environ 32 % des concentrations massiques dans l'air en Europe Centrale (Karagulian *et al.*, 2015). Ces particules émises dans l'air ambiant présentent un important risque sanitaire et environnemental à cause de leur taille, de la nature de leur surface et de leur composition (Dejmek *et al.*, 2000 ; Neuberger *et al.*, 2004 ; Moshammer et Neuberger, 2003 ; Ghio et Devlin, 2001 ; Penttinen *et al.*, 2001). En particulier, la composition en carbone organique (OC) et en carbone élémentaire (EC) des particules permet d'évaluer de manière satisfaisante, complémentaire et nouvelle leur toxicité. Les particules présentes dans l'air ambiant ne sont pas uniquement dues aux émissions de particules solides mais aussi aux différents polluants gazeux (Composés Organiques Volatils, Oxyde d'azote…) qui réagiront dans l'atmosphère et formeront de nouvelles particules (Koppmann *et al.*, 2005). Ainsi, pour mieux évaluer l'impact du chauffage domestique au bois, la mesure des particules doit être accompagnée de diverses analyses des polluants gazeux réalisées simultanément (Johansson *et al.*, 2003).

2 Afin de réduire l'impact du chauffage domestique au bois sur la qualité de l'air, l'identification des facteurs dont l'impact est le plus significatif sur les émissions est un travail indispensable. La littérature décrit les conditions d'utilisations qui représentent les facteurs les plus importants (Nussbaumer, 2010 ; Verma *et al.*, 2009) : les caractéristiques du combustible (Sippula *et al.*, 2007), les réglages d'air (Lamberg *et al.*, 2011) et le mode d'allumage de l'appareil. Les types d'appareils les plus vendus et les plus présents sur le parc d'appareils sont les poêles de petites puissances (Observ'ER, 2016). L'objet de cette étude est donc d'observer les effets de ces facteurs impactant les émissions sur un appareil représentatif du parc, à savoir un poêle de petite puissance.

3 Ainsi, la démarche globale de cette étude est la suivante : après une description des paramètres ressortant comme les plus influents au vu

des résultats du projet QUALICOMB (soutenu par l'ADEME), des essais complémentaires ont été menés sur les paramètres les plus influents pour mieux comprendre les phénomènes ; une attention particulière a été portée au type d'allumage (inversé ou traditionnel) et à son impact. La première phase de l'étude, issue du projet QUALICOMB, présente l'impact sur les émissions de six paramètres : l'essence du combustible, l'humidité du combustible, la présence d'écorce, le calibre du combustible, l'allumage/tirage et les conditions d'utilisations. Un plan d'expérience a ainsi été mis en œuvre afin de définir le(s)quel(s) de ce(s) paramètre(s) étai(en)t le(s) plus impactant(s) sur les performances de l'appareil. Un plan d'expérience permet de réduire le nombre d'essais à réaliser. Bien évidemment, la précision des mesures est affectée par ce procédé. C'est pourquoi, dans la seconde phase, une étude précise des facteurs ressortant comme les plus influents définis lors de la première phase, était essentielle. Ainsi, des essais complémentaires ont été réalisés lors de cette deuxième phase pour affiner les conclusions. Pour terminer, cette étude compare deux modes d'allumage utilisés dans les appareils de chauffage domestique au bois : l'allumage dit « inversé » et l'allumage dit « traditionnel ». Des essais spécifiques ont de nouveau été réalisés pour définir les performances de ces deux types d'allumage.

2. Matériels et méthodes

2.1. Poêle à bois, combustible et procédure expérimentale

4 Le poêle utilisé pour toutes les phases de cette étude est le poêle étanche WABI (D2I INVICTA). Un poêle étanche correspond à un appareil compatible avec les nouvelles réglementations thermiques (RT 2012, notamment). L'appareil est parfaitement étanche pour ne pas prélever l'air comburant dans la pièce où il se trouve, mais à l'extérieur de la maison. Cela signifie qu'un travail d'étanchéité de la porte et des différents joints a été réalisé, permettant une gestion plus optimale des débits et points d'arrivée des différents airs (primaire et secondaire). Ce poêle présente une puissance nominale de 6 kW. Les essais ont été réalisés lorsque l'appareil atteignait son

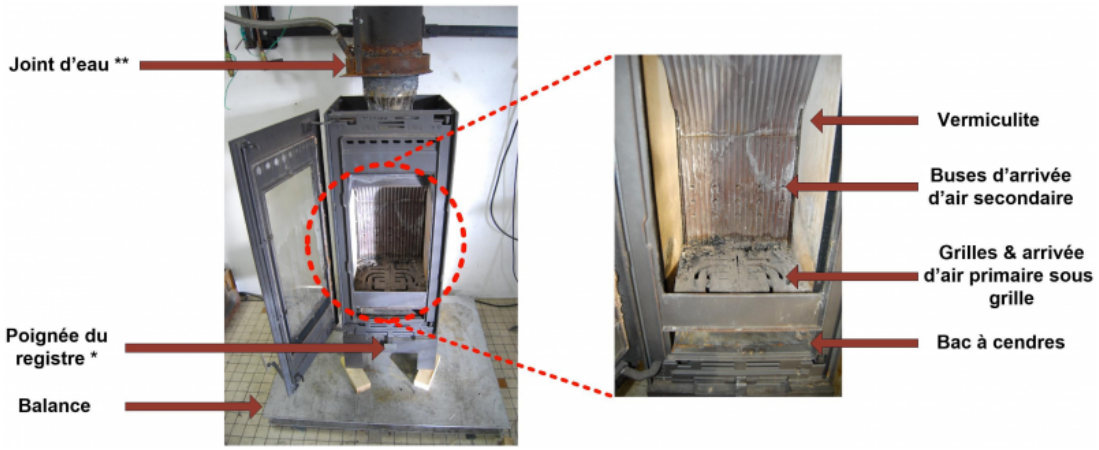
régime nominal, c'est-à-dire qu'il fonctionnait à la puissance pour laquelle ce dernier était vendu. Les performances annoncées de cet appareil sont très élevées, classé Flamme Verte 7 étoiles (description de la classification Flamme Verte, voir tableau 1). La chambre de combustion de cet appareil est isolée par de la vermiculite. Une arrivée d'air primaire est présente sous la grille, et de l'air secondaire est injecté sur la face arrière. La figure 1 présente une photographie annotée de l'appareil. Le tableau 2 présente les deux niveaux extrêmes associés à chacun des paramètres étudiés afin de mettre en évidence leur impact. Le niveau 1 présente les conditions optimales décrites dans la notice d'utilisation du fabricant de l'appareil[1], et le niveau 2 des conditions dégradées ne respectant pas les préconisations d'usage du fabricant.

	Classe énergétique	Rendement énergétique (en %)	Emissions de monoxyde de carbone (en %)*	Emissions de particules fines (en mg/Nm^3)*
Appareils indépendants au bois bûches	5 *****	≥ 70	≤ 0,30	≤ 90
	6 ******	≥ 75	≤ 0,15	≤ 50
	7 *******	≥ 75	≤ 0,12	≤ 40

* Valeurs exprimées à 13 % d'O_2 selon le projet de norme prEN 16510.

Tableau 1. Définition de la classification Flamme Verte (https://www.flammeverte.org/decouvrir-flamme-verte/comprendre-etiquette)

Definition of the Flamme Verte classification.



* : permet de régler le débit d'air dans l'appareil.
** : permet d'installer l'appareil sur une balance sans pour autant peser les conduits de fumées. Le joint d'eau est un système étanche à l'air sur lequel on vient raccorder un appareil sur une plate-forme de laboratoire.

Figure 1. Description du poêle WABI.
Description of the WABI firewood.

Tableau 2. Définition des paramètres et de leur niveau de variation.
Definition of the parameters and their variation.

	Caractéristiques du combustible				Réglage de l'appareil et de la plate-forme expérimentale	
Niveau	Humidité	Essence	Calibre	Ecorces	Allumage/Tirage	Utilisation
1	≤ 20 %	Feuillus	2 bûches	Sans écorce	Chaud/Régulé	Bonne
2	≥ 30 %	Résineux	1 bûche	Avec écorce	Froid/Naturel	Dégradée

Pour rappel, cet appareil fonctionne de manière optimale avec du feuillu ayant une humidité maximale sur brut de 20 %. Le réglage idéal décrit dans la notice d'utilisation correspond à une ouverture moyenne du registre (figure 2a), alors que l'utilisation dégradée correspond à une ouverture au quart du registre (figure 2b). Ainsi, lorsque l'appareil est utilisé avec une « utilisation dégradée », cela signifie finalement un manque d'air dans la chambre de combustion. Bien que déconseillé par le fabricant, ce réglage est souvent constaté chez les particuliers car il permet d'augmenter la durée de combustion d'une charge (réduction des arrivées d'air le soir pour une meilleure tenue de la combustion durant la nuit). Le fait que l'appareil soit un poêle étanche signifie que ce paramètre aura une influence très importante sur les débits d'air et donc sur la tenue de la combustion (débit de fuites négligeable) contrairement à un appareil ancien pour lequel les débits de fuites peuvent être conséquents.

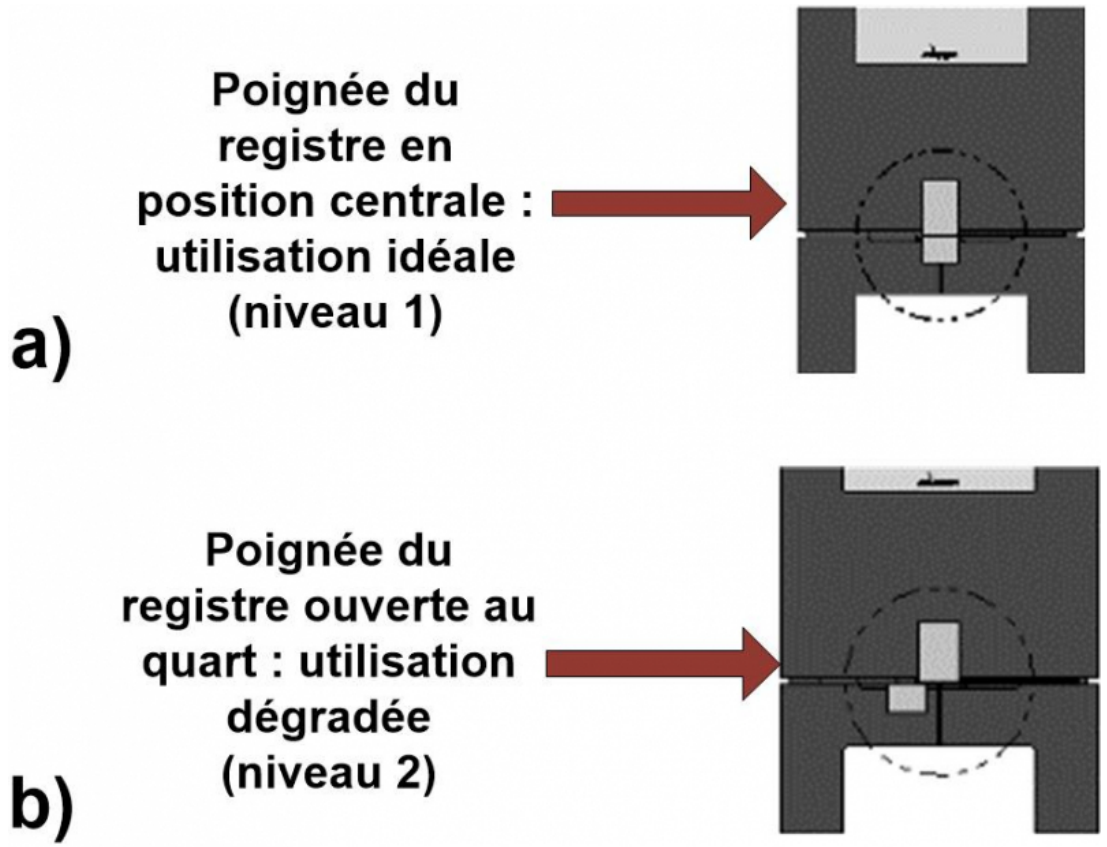


Figure 2. Définition des niveaux d'utilisations.
Definition of the both used levels.

L'essence feuillue utilisée était du chêne, et le sapin représentait la famille des résineux. Le tableau 2 présente les caractéristiques de ces combustibles. Toutes ces mesures ont été réalisées en accord avec les différentes normes : humidité EN 14774 ; pouvoir calorifique EN 14918 ; taux de cendres EN 14775. Dans ce tableau est aussi présenté le combustible utilisé pour les essais sur l'impact de la méthode d'allumage : du hêtre sans écorce.

Tableau 3. Caractéristiques des différents combustibles.
Characterization of the fuels.

		Humidité (%)		PCS (kJ.kg-1)	PCI humide (kJ.kg-1)		Taux de cendres à 550 °C (%)
		Niveau 1	Niveau 2		Niveau 1	Niveau 2	
Phase 1 & 2	Chêne sans écorces	12	39	19331	15845	12335	0.55
	Chêne avec écorces	12.7	30.2	19221	15492	14416	0.84

de l'étude	**Sapin sans écorces**	14.4	78.9	19546	15678	8132	0.82
	Sapin avec écorces	14.9	72.6	19236	15221	9561	1.02
Phase 3 de l'étude	**Hêtre sans écorces**	12	X	19672	16700	X	0.27

Le paramètre allumage/tirage est un regroupement de deux paramètres. Le niveau 1 correspond finalement aux exigences d'essais du projet de norme PR EN 16510 (bûches sur lit de braises avec un tirage régulé à 12 Pa) mais aussi aux conditions conseillées par le fabricant dans sa notice d'utilisation, alors que le niveau 2 correspond à l'allumage de l'appareil chez le particulier (chambre froide et tirage naturel). Le tirage à 12 Pa est obtenu et régulé *via* un extracteur de fumée. Le tirage naturel est quant à lui non maîtrisé et dépend énormément des conditions climatiques, de la température des conduits, de la longueur et de la nature des conduits, ainsi que des pertes de charge liées à de potentiels angles dans le conduit d'évacuation des fumées.

Pour l'étude sur le mode d'allumage, deux types ont été observés : l'allumage dit traditionnel et l'allumage inversé (dit « Top&Down »). La figure 3 schématise le principe de ces deux types d'allumage. Les masses de bois étaient similaires pour chacun des essais afin de pouvoir comparer les émissions pour des conditions semblables. Les prélèvements débutaient dès la mise à feu du système et prenaient fin à l'extinction des flammes. En effet, un utilisateur rechargerait son appareil à ce moment précis. Les essais ont été répétés trois fois afin d'obtenir des résultats robustes.

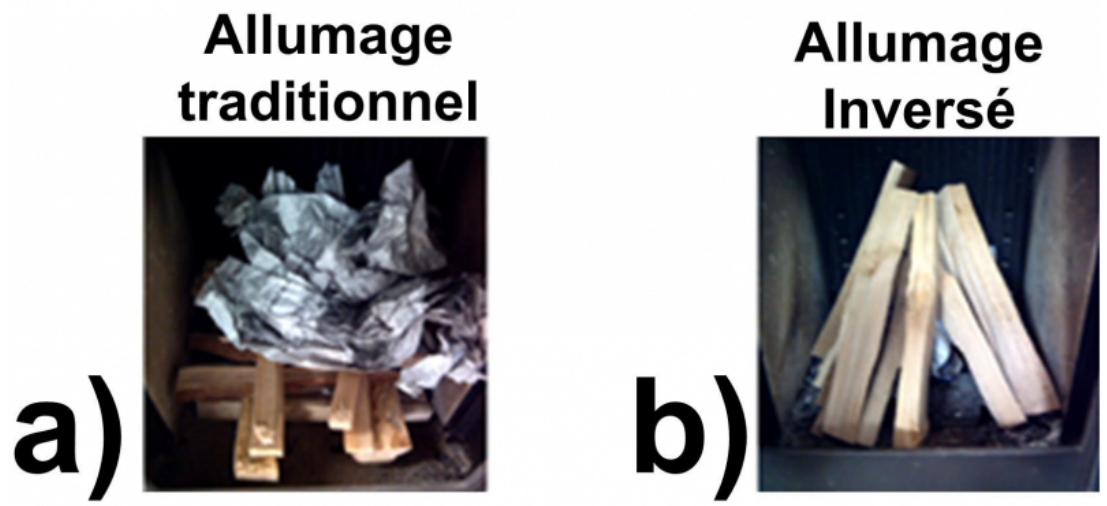


Figure 3. Description de l'allumage traditionnel (a) et de l'allumage inversé (b) (figure issue de Brandelet *et al.*, 2018).

Description of the traditional ignition (a) and the top-down ignition (figure issued of Brandelet* et al., *2018).

La plate-forme expérimentale utilisée pour l'intégralité des essais présentés dans cette étude est décrite de manière schématique dans la figure 4.

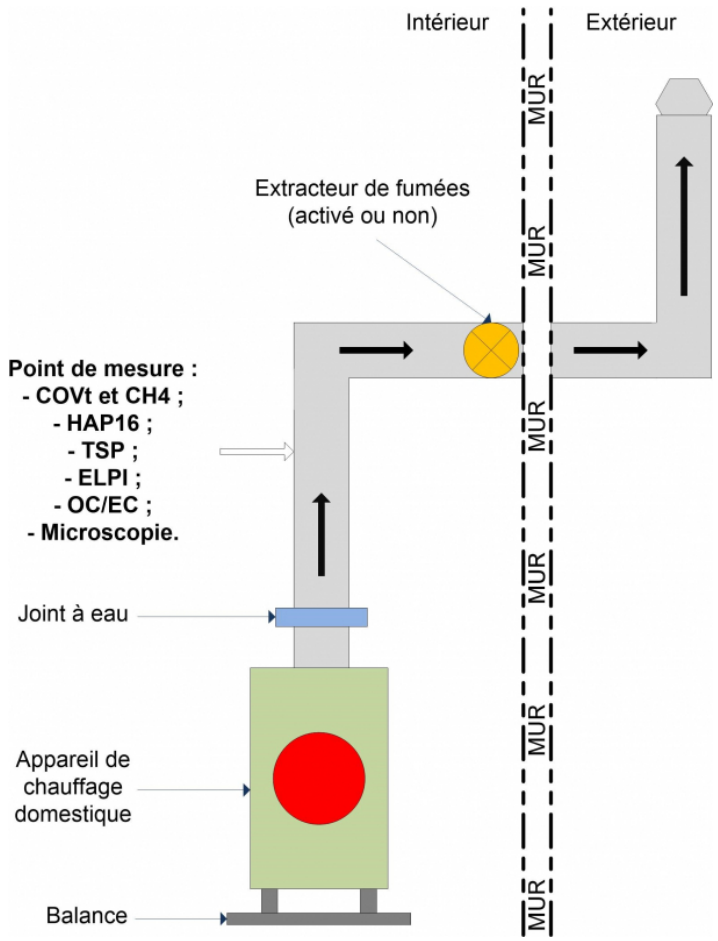


Figure 4. Description de la plate-forme expérimentale.
Description of the experimental platform.

2.2. Prélèvement et analyse

2.2.1. Mesures physiques et analyses des gaz

5 Pour les essais issus du plan d'expérience du projet QUALICOMB, seules les concentrations dans les fumées en CO, CO_2 et O_2 étaient mesurées *via* des cellules électrochimiques (TESTO 350 XL). Dans les essais pour observer plus finement certains paramètres ainsi que la méthode d'allumage, diverses méthodes d'analyses ont été déployées (HORIBA, PG350 ; ENVIRONEMENT SA, Graphite 52M) : NO par chimiluminescence ; SO_2, CO, CO_2 par infrarouge non-dispersif ; O_2 par paramagnétisme ; Composés Organiques Volatils (COV) par détecteur à ionisation de flamme (FID). Dans l'intégralité des essais, l'appareil de combustion était disposé sur une balance avec une résolution de 20 g pour suivre finement la perte de masse, ainsi qu'une mesure de la température des fumées (thermocouple type K) au point de référence défini par la EN 13229.

2.2.2. Prélèvement et analyses des particules

6 Dans l'intégralité des essais, les particules totales (TSP) ont été prélevées. Ce prélèvement est réalisé *via* une canne isocinétique régulée à 160 °C sur un filtre en fibre de quartz chauffé lui aussi à 160 °C. Le conditionnement du filtre était réalisé en accord avec le projet de norme EN 16510. Lors des essais complémentaires et de l'étude de l'impact du mode d'allumage, d'autres méthodes de prélèvements et d'analyses ont été mises en œuvre. Ainsi, la granulométrie aérodynamique des particules en nombre était mesurée *via* un impacteur électrique basse pression (ELPI). Un second prélèvement sur filtre en fibre de quartz permettait de réaliser les analyses en carbone organique (OC) et en carbone élémentaire (EC), selon la méthode décrite par Brandelet *et al.* (2017). Afin de mieux visualiser les phénomènes, des prélèvements de particules sur des filtres en polycarbonate ont permis de réaliser des clichés des particules à l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage à émission de champs (MEB FEG). Un prélèvement supplémentaire a été réalisé lors de la phase 2 de cette étude (étude plus précise des facteurs ressortant comme majeurs de la phase 1 de l'étude) : le prélèvement et l'analyse des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques 16 (HAP16) en accord avec la norme NF X 43-329 et NF X 43-229. Les HAP16 sont : Naphtalène, Acénaphtylène, Acénaphtène, Fluorène, Phénanthrène, Anthracène, Fluoran-

thène, Pyrène, Benzo (a) anthracène, Chrysène, Benzo (b) fluoranthène, Benzo (k) fluoranthène, Benzo (a) pyrène, Dibenzo (a,h) anthracène, Benzo (ghi) pérylène, Indéno (1,1,3 cd) pyrène.

3. Résultats et discussions

3.1. Résultats de la phase 1 de l'étude : identification des paramètres majeurs

7 En premier lieu, l'influence de chacun des paramètres lors de sa variation de niveau a été observée. Pour quantifier cette évaluation, un ou plusieurs critère(s) doi(ven)t être sélectionné(s). Deux critères ont ainsi été choisis : les émissions TSP et l'indice I'. L'indice I' est une valeur calculée pour classer les appareils dans le cadre du label Flamme Verte. Cet indice prend en compte les émissions de CO, les émissions TSP et le rendement de l'appareil. Comme l'indice I' indique de meilleures performances de l'appareil si ce dernier est faible, la variation de cet indice entre les niveaux 1 et 2 pour chacun des paramètres permettra d'évaluer leur impact global. Les TSP ont également été choisies car les particules représentent *a priori* le principal enjeu de la combustion du bois. Afin d'évaluer l'impact d'un paramètre, des essais ont été réalisés au niveau 1 puis au niveau 2. Il suffit ensuite de regarder l'évolution des critères choisis pour connaître l'impact (positif ou négatif, majeur ou mineur) du paramètre étudié. La figure 5 présente la variation en TSP et en I' des différents paramètres.

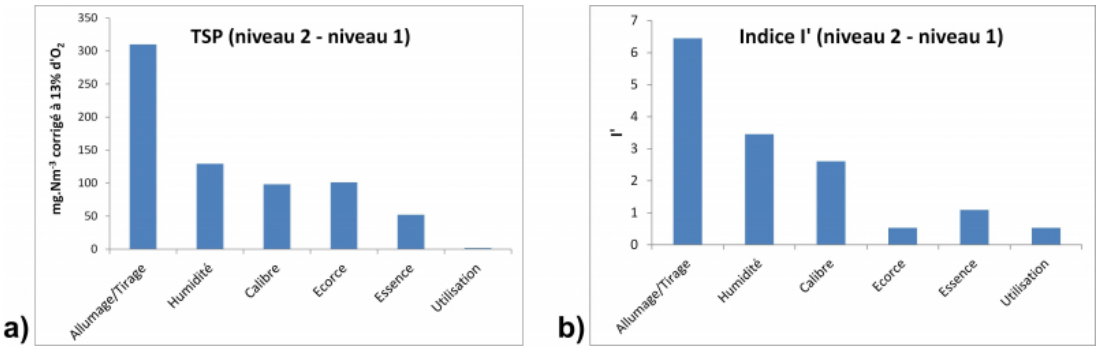


Figure 5. Variation en émission de TSP (a) et en indice I' (b) entre les niveaux 1 et 2 de chaque paramètre.
Variation of the TSP emissions (a) of I' (b) from level 1 to level 2 for each parameter.

Plusieurs points sont à noter sur ces figures. Rappelons que les valeurs données ne peuvent pas être utilisées hors contexte et ne sont pas non plus représentatives de la réalité, puisqu'elles représentent une exagération de l'effet de chacun des paramètres afin de mettre ces effets en évidence. Le plan d'expérience imposait une non-action de l'utilisateur mais aussi l'étude des paramètres à leur niveau extrême. Ainsi, seule l'amplitude de cette variation est intéressante. Plus cette variation est importante, plus le paramètre joue un rôle majeur. Le deuxième point à relever concerne le paramètre « utilisation ». Ce paramètre présente des variations conséquentes durant les essais, mais les moyennes en réduisent considérablement l'impact sur ce type de schéma. L'impact de l'utilisation est majeur mais ne sera pas détaillé davantage dans ce travail. Ce phénomène ne concerne que le paramètre « utilisation » puisque les autres paramètres présentaient des variations beaucoup plus répétables. Ensuite, le classement des paramètres, du plus influent au moins influent, est similaire s'il est réalisé sur les variations en TSP ou I'. Le classement est le suivant :

- 1 : allumage/tirage ;
- 2 : humidité ;
- 3 : calibre ;
- 4 : écorce ;
- 5 : essence.

Ainsi, l'essence de bois serait un paramètre n'impactant que faiblement les émissions comparativement aux autres. L'impact du calibre était attendu : en effet, à quantité équivalente, une unique bûche met plus de temps à monter en température que deux bûches. De plus, la surface d'échange avec l'air étant plus importante, le mélange peut être meilleur. Les niveaux de température sont donc plus favorables lorsque deux bûches sont placées dans l'appareil. Si les températures sont plus élevées, la combustion sera plus efficace. En effet, une combustion efficace suit la règle des 4T (qui consiste à trouver le meilleur compromis entre les paramètres suivants : Température de la chambre de combustion, Teneur en dioxygène dans la chambre de combustion, Temps de séjour des gaz dans la chambre de

combustion et Turbulence dans la chambre de combustion) (Rogaume, 2005). En revanche, l'impact de la présence d'écorces sur le combustible n'était pas supposé être si élevé. L'allumage/tirage est le paramètre impactant le plus les résultats. Pourtant, l'allumage de l'appareil à froid est une phase obligatoire pour l'utilisateur. Il devient donc primordial de développer des techniques permettant de limiter les émissions des appareils de chauffage domestique au bois lors de leur allumage. Ainsi, dans la suite de cette étude, trois paramètres vont être étudiés plus en détails : l'influence du mode d'allumage, l'influence de l'humidité du combustible et l'influence de la présence d'écorces.

3.2. Zoom sur l'impact de l'écorce

8 Pour observer de plus près l'impact de l'écorce sur les émissions et les performances de l'appareil, deux essais supplémentaires ont été réalisés. De plus, un essai a été mené en utilisant de l'écorce pure afin d'exagérer l'effet. Les essais ont été réalisés avec du chêne humide, sans écorce puis avec écorce. L'écorce ne représentait que 10 % de la masse totale de la bûche dans le second cas. Le tableau 4 présente l'intégralité des résultats d'émissions.

Combustibles	Répétition	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	NO (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	SOx (mg.Nm^{-3} Eq. SO_2 à 13% d'O_2)	COVt (mg.Nm^{-3} Eq. CH_4 à 13% d'O_2)	CH_4 (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	Tfumées (°C)	TSP (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	OC/TC (%)	TC/TSP (%)	OC/TSP (%)	EC (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	OC (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	$PM_{0.1}$ ($\%_{en\ nombre}$)	$PM_{0.1-1.0}$ ($\%_{en\ nombre}$)	$PM_{1.0-2.5}$ ($\%_{en\ nombre}$)	$PM_{2.5-10}$ ($\%_{en\ nombre}$)
Bois humide sans écorces	1	12	9	5015	114	0	293	37	221	72	92.9	64.7	60.1	3	43	63.2	36.8	0.02	0.01
	2	14.4	6.6	10164	233	0	849	142	155	83	91.6	72.4	66.3	5	55	73.9	26	0.02	0.01
	Moyenne	**13**	**8**	**7590**	**174**	**0**	**571**	**90**	**188**	**78**	**92**	**69**	**63**	**4**	**49**	**68.55**	**31.40**	**0.02**	**0.01**
Bois humide avec écorces	1	15.8	5.3	8112	116	119	73	13	168	259	92.2	14	12.9	3	33	76.4	23.6	0.02	0.01
	2	15.1	5.9	5453	76	51	83	15	187	137	96	18.5	17.8	1	24	65.1	32.2	0.7	0
	Moyenne	**15**	**6**	**6783**	**96**	**85**	**78**	**14**	**178**	**198**	**94**	**16**	**15**	**2**	**29**	**70.75**	**27.90**	**0.36**	**0.01**
Ecorces seules	1	10.2	10.8	4196	75	35	307	84	226	446	83.3	55.2	46	41	205	74.4	25.5	0.04	0.01
	2	11.2	9.8	8863	113	33	368	192	230	659	69.8	22.6	15.8	45	104	78.8	21.1	0.09	0.02
	Moyenne	**11**	**10**	**6530**	**94**	**34**	**338**	**138**	**228**	**553**	**77**	**39**	**31**	**43**	**155**	**76.60**	**23.30**	**0.07**	**0.02**

Tableau 4. Résultats des émissions pour l'étude de l'impact de la présence d'écorces.
Emissions results for the study on the impact of the presence of bark.

Aucune conclusion claire ne peut être faite sur les émissions de CO au vu de la variabilité des résultats. Les émissions de NO, de COVT et de CH_4 sont plus faibles avec un combustible bois/écorce qu'avec du bois sans écorce. Ce point est particulièrement surprenant mais peut s'expliquer par la durée

de l'essai. L'écorce augmente la durée de l'essai. L'essai avec le bois humide sans écorce a duré 42 minutes en moyenne quand l'essai avec le bois humide avec écorce a duré 51 minutes. Les gaz de pyrolyse sont donc émis plus lentement lorsqu'il y a présence d'écorce, et permettent donc une combustion légèrement plus complète. En revanche, les émissions de SOx paraissent clairement liées à la présence d'écorce. La composition de l'écorce (riche en soufre) explique ce phénomène.

Il apparaît que la présence d'écorce augmente les émissions de TSP. Les particules carbonées émises par la combustion de bois humide avec écorce présentent un ratio OC/TC (TC : carbone total) moyen équivalent à celles émises par la combustion de bois humide sans écorce. Pourtant, lors de la combustion d'écorce seule, ce ratio chute de 20 %. La quantité d'écorce présente sur la bûche n'est *a priori* pas suffisante pour impacter les résultats. En revanche, le taux de carbone moyen dans les TSP chute si le combustible possède de l'écorce. Cela est probablement dû à la forte concentration en éléments non carbonées dans l'écorce. Les émissions d'EC et d'OC semblent diminuer en présence d'écorce. Finalement, l'écorce joue un rôle majeur dans les émissions particulaires. En effet, elle émet de nombreuses particules non carbonées, et limite les émissions d'EC et d'OC. Durant la combustion, une part des minéraux et des métaux serait émise sous forme particulaire, et une autre part serait piégée dans le charbon entourant la bûche, lié à l'écorce. Les minéraux et les métaux étant des catalyseurs de l'oxydation, les gaz de pyrolyse et les émissions particulaires seraient oxydés lors de leur traversée du charbon issu de la pyrolyse de l'écorce. Ce phénomène expliquerait la chute des émissions de COVT et de CH_4. La granulométrie en nombre des particules semble n'être que légèrement impactée par la présence d'écorce *via* une légère augmentation de la fraction ultrafine. Les clichés MEB mettent en évidence un seul point : la présence d'écorce induit la présence d'une nouvelle famille de particules dans les émissions, les nano-cristaux de silice et/ou de sodium, comme le présente la figure 6.

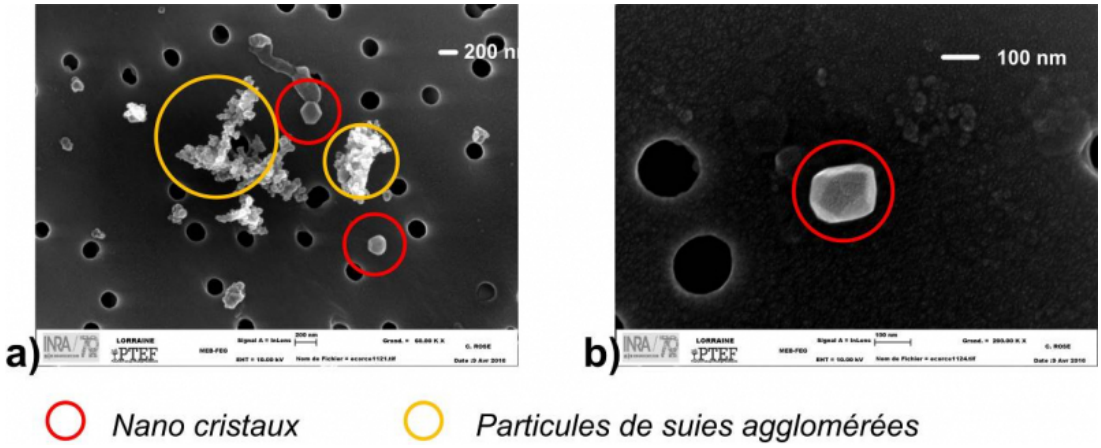


Figure 6. Clichés MEB d'un mix de particules (a, x 60 000) et zoom sur un nano-cristal (b, x 200 000).

SEM pictures of many particles (a, x 60 000) and a nano-cristal (b, x 200 000).

Concernant les émissions de HAP 16, la figure 7 présente les résultats obtenus.

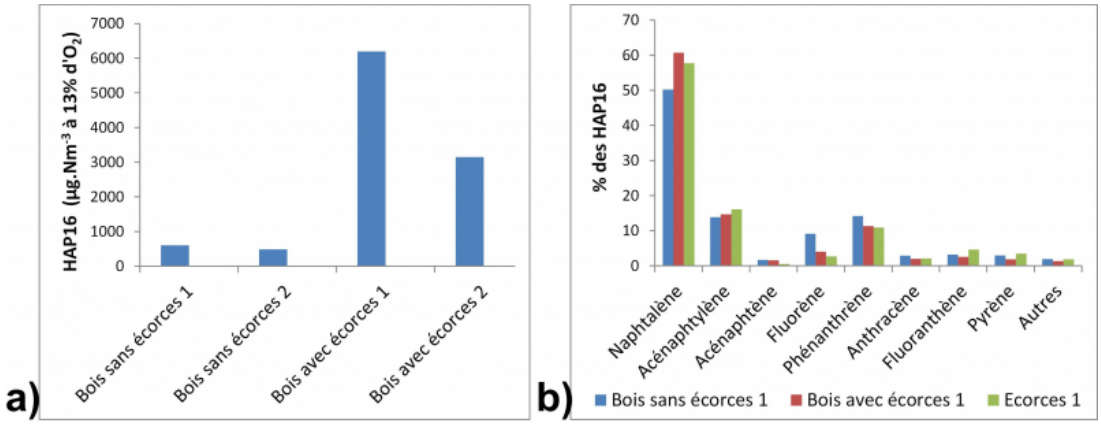


Figure 7. Bilan des émissions de HAP16 pour chaque type d'essai (a) et répartitions des différentes molécules (b) émises.

PAH16 emissions for each experimentaion (a) and molecules repartition (b).

Ainsi, la présence d'écorce sur le combustible multiplie au minimum par trois les émissions de HAP16 par rapport à un combustible sans écorce. Le combustible « bois avec écorce » induit aussi une composition des HAP16 spécifique avec 60 % de naphtalène, 15 % d'acénaphtylène et 10 % de

phénanthrène. Cette composition est identique à celle déterminée lors de la combustion d'écorce seule. Tous les autres HAP restent dans des proportions mineures.

3.3. Zoom sur l'impact de l'humidité

9 Les essais permettant la caractérisation fine de l'impact de l'humidité du combustible ont été réalisés avec du chêne. Le tableau 5 présente les résultats de ces essais.

Combustibles	Répétition	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	NO (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	SOx (mg.Nm^{-3} Eq. SO_2 à 13% d'O_2)	COVt (mg.Nm^{-3} Eq. CH_4 à 13% d'O_2)	CH_4 (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	Tfumées (°C)	TSP (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	OC/TC (%)	TC/TSP (%)	OC/TSP (%)	EC (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	OC (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	$PM_{0.1}$ (%en nombre)	$PM_{0.1-1.0}$ (%en nombre)	$PM_{1.0-2.5}$ (%en nombre)	$PM_{2.5-10}$ (%en nombre)
Bois sec sans écorces	1	9.7	11.3	2329	39	1	62	11	240	1	96.8	89.1	86	0	1	90.1	9.9	0.01	0
	2	8.2	12.8	1760	65	1	94	13	258	3	92.6	94	86.4	0	2	84.5	15.5	0.01	0.01
	Moyenne	**9**	**12**	**2045**	**52**	**1**	**78**	**12**	**249**	**2**	**95**	**92**	**86**	**0**	**2**	**87.30**	**12.70**	**0.01**	**0.01**
Bois humide sans écorces	1	12	9	5015	114	0	293	37	221	72	92.9	64.7	60.1	3	43	63.2	36.8	0.02	0.01
	2	14.4	6.6	10164	233	0	849	142	155	83	91.6	72.4	66.3	5	55	73.9	26	0.02	0.01
	Moyenne	**13**	**8**	**7590**	**174**	**0**	**571**	**90**	**188**	**78**	**92**	**69**	**63**	**4**	**49**	**68.55**	**31.40**	**0.02**	**0.01**

Tableau 5. Résultats des émissions pour l'étude de l'impact de l'humidité.
Emissions results for the study on the impact of the fuel moisture.

Notons tout d'abord que la stabilité des émissions est bonne dans le cas d'une bûche sèche, mais beaucoup plus aléatoire dans le cas d'une bûche humide. La température des fumées est beaucoup moins élevée avec des bûches humides. À l'opposé, les fumées présentent un taux de dioxygène plus élevé lorsque les bûches sont humides. Ces deux phénomènes sont liés : en effet, si l'humidité du combustible augmente, l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau du combustible sera plus importante. La température sera donc plus faible. Cette faible température induit une vitesse de pyrolyse plus faible, et donc une quantité plus faible de gaz de pyrolyse produits. Comme la quantité de gaz à oxyder est plus faible, la concentration en dioxygène va augmenter, diminuant alors la température, etc. Les émissions de NO sont plus importantes malgré une température plus faible. Les émissions de SOx sont faibles avec une bûche sèche et totalement indétectables avec une bûche humide.
Contrairement aux émissions gazeuses, les émissions de TSP semblent très répétables, même avec des bûches humides. Les émissions en TSP sont environ 35 fois plus importantes avec une bûche humide. Le ratio OC/TC

est similaire dans les deux cas, et compris entre 90 et 95 %. En revanche, le ratio TC/TSP varie fortement. En effet, ce ratio est compris entre 90 et 95 % avec des bûches sèches contre 64 à 73 % avec des bûches humides. Ainsi, l'humidité des bûches est un facteur très impactant sur les émissions de particules non carbonées. Les émissions d'EC et d'OC varient donc aussi énormément, en passant d'une moyenne respective de 0,12 et 1,61 $mg.Nm^{-3}$ à 13 % d'O_2 avec du bois sec, à 4,17 et 49,09 $mg.Nm^{-3}$ à 13 % d'O_2 avec des bûches humides. Shen *et al.* (2013) avaient démontré que toutes les émissions d'une cuisinière, hormis les émissions d'EC, étaient augmentées pour une humidité du combustible plus élevée. Dans notre cas, les émissions d'EC augmentent également. Cette différence provient certainement du type d'appareils étudié. Concernant la granulométrie en nombre des particules, une bûche humide induit une répartition clairement différente avec des particules proportionnellement plus grandes en taille. Ce point est en cohérence avec les clichés MEB. La combustion de bûche sèche induit des émissions particulaires composées essentiellement de nanoparticules (aussi appelées sphérules) faiblement agglomérées avec un diamètre moyen compris entre 20 et 50 nm. Une bûche humide induit des émissions plus variées : particules de charbon, particules de bois dégradé thermiquement, nanoparticules. De plus, la taille des nanoparticules est plus importante, pouvant aller jusqu'à 200 nm, et ne sont pas du tout agglomérées. Cette augmentation de la taille peut s'expliquer par une condensation importante de COSV (Composés Organiques Semi-Volatils) sur les nanoparticules due à des niveaux de températures plus faibles. La figure 8 présente ces clichés.

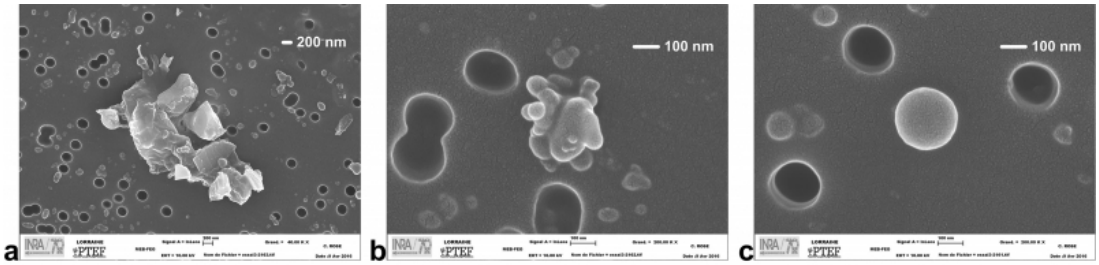


Figure 8. Clichés de morceaux de charbon (a, x 40 000), de bois thermiquement dégradé (b, x 200 000) et de nanoparticules (c, x 200 000) émis par la combustion de bûches humides.

Pictures of pieces of charcoal (a, x 400 000), thermally degraded wood (b, x 200 000) and nanoparticles (c, x 200 000) emitted during the combustion of wet logs.

Les émissions de HAP16, en termes de quantité mais aussi de nature chimique, sont aussi complètement modifiées selon l'humidité du combustible (figure 9). Ainsi, la quantité de HAP16 émise est multipliée par deux lorsque le combustible présente un taux d'humidité important. Avec des bûches humides, les proportions de naphtalène, de fluoranthène et de pyrène diminuent au profit de l'acénaphtylène, du fluorène, du phénanthrène et de l'anthracène.

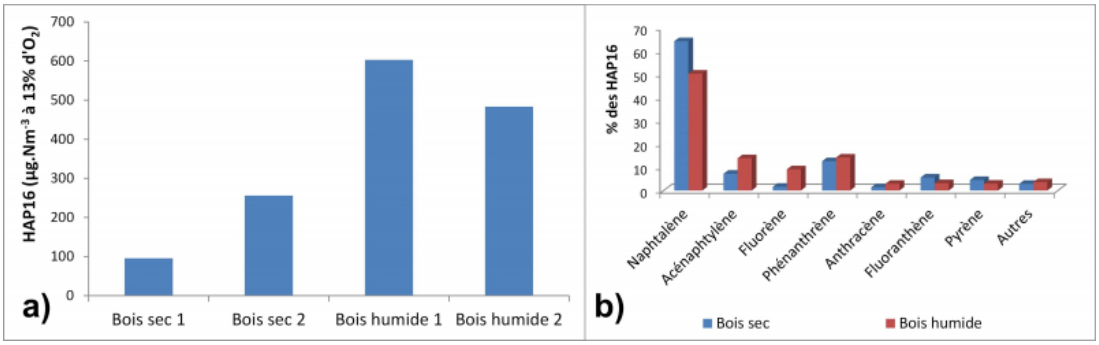


Figure 9. Bilan des émissions de HAP16 pour chaque essai (a) et répartition des HAP majoritaires (b).
PAH16 emissions for each experimentaion (a) and repartition of the predominant PAH (b).

3.4. Zoom sur le mode d'allumage

10 L'intégralité des résultats sur l'influence du mode d'allumage est présentée dans le tableau 6. Le premier point majeur à relever est la répétabilité accrue des essais, avec des écarts-types sur les mesures extrêmement faibles. L'allumage inversé induit un taux d'oxygène plus élevé d'environ 2 %. L'allumage inversé permet une combustion plus progressive, et donc un taux de dioxygène plus stable dans le temps. Les émissions de CO sont ainsi considérablement réduites (environ 2,5 fois moins) avec l'allumage inversé. Les émissions de COV et de CH_4 sont également réduites, de manière similaire. La réduction

des émissions d'imbrûlés gazeux démontre que la combustion est mieux maîtrisée dans le cas d'un allumage inversé. En revanche, les émissions de NO ne semblent pas être significativement impactées par le mode d'allumage. Les émissions de SOx sont quant à elles divisées par six avec cette technique. Il apparaît ainsi, au moins au niveau des émissions gazeuses, que l'allumage inversé est une solution pertinente pour réduire l'impact environnemental du chauffage au bois, d'autant que cette phase a été répertoriée comme ayant un impact très significatif sur les émissions par le plan d'expériences.

11 Concernant les émissions de particules, plusieurs phénomènes se déroulent. Tout d'abord, les émissions de particules totales sont réduites de 32 % en masse. Miljevic *et al.* (2010) ont estimé une réduction par un facteur compris entre 2 et 5 en réalisant des essais sur différents appareils. Ainsi, le type d'appareil semble modifier l'ampleur de la réduction. De plus, comme la combustion est significativement mieux maîtrisée lors d'un allumage inversé, les émissions de carbone organique (OC) sont aussi réduites. En revanche, dans l'appareil que nous avons utilisé, les émissions de carbone élémentaire (EC) sont plus importantes lors d'un allumage inversé que durant un allumage traditionnel. Ce résultat est sans doute lui aussi spécifique à cet appareil. Des études complémentaires sur d'autres appareils sont certainement nécessaires pour vérifier la pertinence de ce résultat. Cependant, les ratios OC et EC de chaque type d'allumage sont cohérents avec ceux décrits dans la littérature (Shen *et al.*, 2013 ; Schmidl *et al.*, 2011 ; Shen *et al.*, 2014) tout comme leur variation d'un mode d'allumage à l'autre (Vicente *et al.*, 2015 ; Vicente, Duarte *et al.*, 2015). La granulométrie des particules varie aussi selon le mode d'allumage. Ainsi, l'allumage inversé émet des particules en nombre dont la taille est majoritairement concentrée dans la fraction ultrafine (plus de 80 % des PM < 0.1 nm). Lors d'un allumage traditionnel, les particules émises sont, en proportion du nombre de particules émises, moins fines (moins de 70 % des PM < 0.1 nm). Ce résultat est en accord avec le travail de Johansson *et al.* (2004).

Mode d'allumage	O_2 (%)	CO_2 (%)	CO (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	NO (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	SOx (mg.Nm^{-3} Eq. SO_2 à 13% d'O_2)	COVt (mg.Nm^{-3} Eq. CH_4 à 13% d'O_2)	CH_4 (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	Tfumées (°C)	TSP (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	OC/TC (%)	TC/TSP (%)	OC/TSP (%)	EC (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	OC (mg.Nm^{-3} à 13% d'O_2)	$PM_{0.1}$ (%en nombre)	$PM_{0.1-1.0}$ (%en nombre)	$PM_{1.0-2.5}$ (%en nombre)	$PM_{2.5-10}$ (%en nombre)
Inversé	12.3	8.2	2193	70	5	152	35	240	49	19.8	95.4	18.9	37	9	80.7	19.3	0.02	0.01
Ecart-type inversé	0.7	0.7	48	3	0	39	7	6	1	5.1	1.2	5.0	6	2	2.3	2.3	0.0	0.0
Traditionnel	10.7	9.5	4696	64	30	326	109	265	72	64.2	73.2	46.8	19	34	68.9	31.1	0.02	0.01
Ecart-type traditionnel	0.5	0.4	363	6	5	34	4	7	4	2.9	5.8	2.2	8	15	2.5	2.5	0.0	0.0
Traditionnel - Inversé	-1.6	1.3	2503	-6	24	175	74	25	23	44.5	-22.2	27.9	-18	25	-11.7	11.7	0.0	0.0

Variation non-significative OU non-déterminante pour le choix d'une méthode d'allumage
Variation significativement positive, signifiant une meilleure performance de l'allumage inversé par rapport à l'allumage traditionnel
Variation significativement négative, signifiant une meilleure performance de l'allumage traditionnel par rapport à l'allumage inversé

Tableau 6. Résultats des émissions des deux modes d'allumage étudiés.
Emissions results for the both studied ignitions.

Les clichés MEB permettent de mieux visualiser les particules émises par les deux modes d'allumage. La combustion étant mieux maitrisée dans le cas de l'allumage inversé, les agglomérats de nanoparticules sont plus petits, et les sphérules sont assez distinctes. En revanche, dans le cas de l'allumage traditionnel, il est difficile d'affirmer que les particules visualisées sont des agglomérats de nanoparticules (sphérules peu distinctes) ou de la matière initiale du bois qui aurait fondu. La figure 10 présente deux clichés illustrant ces propos.

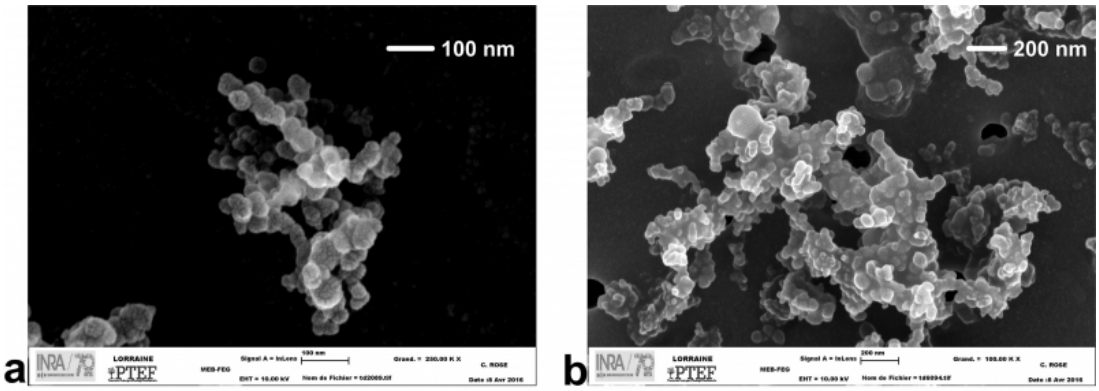


Figure 10. Clichés d'agglomérats de nanoparticules lors de l'allumage inversé (a, x 250 000) et de matière fondue et/ou agglomérat lors de l'allumage traditionnel (b, x 100 000).

Pictures of nanoparticles agglomerated emitted during the top-down ignition (a, x 250 000) and of melted material and/or agglomerates emitted during the traditional ignition (b, x 100 000).

L'allumage traditionnel induit une nouvelle famille de particules ou de précurseurs de ces particules dans les émissions. La figure 11 en présente un cliché. Chakrabarty *et al.* (2010) supposent que ces particules sont des COSV condensés. Cette supposition serait en accord avec nos résultats, puisque les COSV sont majoritairement émis lorsque la combustion est mal maîtrisée, ce qui est le cas lors de l'allumage traditionnel.

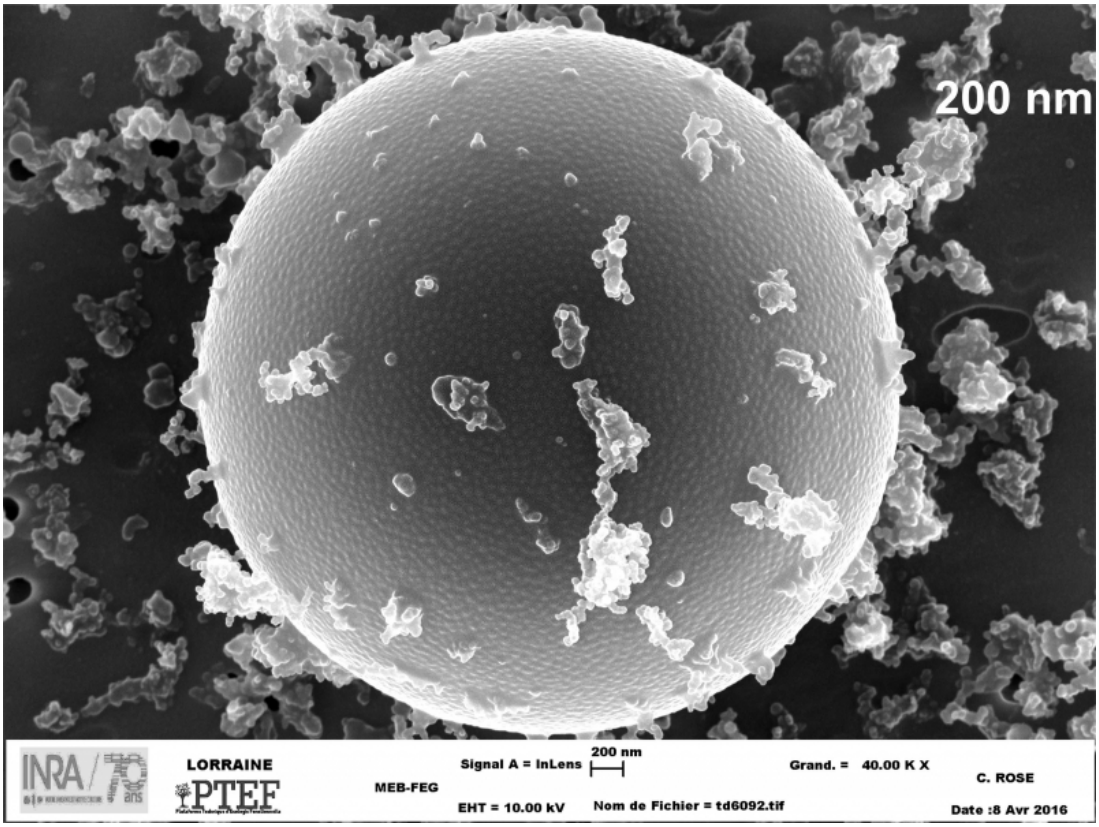


Figure 11. Cliché de condensats de Composés Organiques Semi-Volatils émis lors de l'allumage Traditionnel (x 40 000).
Pictures of condensed SVOC emitted during the traditional ignition (x 40 000).

4. Conclusion

12 Ces travaux ont permis de mettre en exergue l'impact de plusieurs paramètres. Tout d'abord, la première phase de cette étude a démontré que l'humidité, la présence d'écorce et le calibre du combustible jouaient un rôle majeur dans les performances d'un appareil, même à puissance nominale.

13 Si l'humidité du combustible est élevée, les émissions d'imbrûlés gazeux et de particules sont très largement augmentées. Les émissions de HAP16 sont aussi impactées. Leur quantité augmente, et leur nature se modifie, présentant des molécules avec des chaînes carbonées plus longues. L'écorce induit quant à elle des émissions de SOx et de nano-cristaux. De plus, tout comme pour l'humidité, les émissions de HAP16 sont considérablement augmentées si le combustible présente de l'écorce. Ainsi, le combustible idéal allierait trois paramètres clés : humidité aux environs de 12 % ; combustible sans écorces ; bûches de petit calibre.

14 L'allumage de l'appareil est aussi une phase pendant laquelle les performances de l'appareil sont dégradées. Même si cette phase ne peut être supprimée, des modes d'allumage peuvent permettre de réduire l'impact. Ainsi, nous avons observé l'effet de deux modes d'allumage : il apparaît que l'allumage inversé permet de réduire de manière significative les émissions d'imbrûlés gazeux et de particules par rapport à l'allumage traditionnel.

15 Les résultats permettent ainsi de mieux cibler les points majeurs sur lesquels l'utilisateur doit être formé/informé. De plus, le projet QUALICOMB a aussi permis de réaliser une liste prioritaire de problématiques à résoudre pour améliorer les performances du chauffage au bois bûches et réduire son impact environnemental.

Cette étude a été réalisée grâce au support financier de l'ADEME. Elle a été menée par les laboratoires CERIC (POUJOULAT) et LERMAB, ainsi que les industriels D2I INVICTA et SEGUIN DUTERIEZ. Le LERMAB est supporté par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du programme « Investissement d'Avenir » (ANR-11-LABX-0002-01. *Laboratoire d'excellence* ARBRE) *et fait partie de l'ICEEL (Institut Carnot sur l'Environnement et l'Énergie en Lorraine).*

NOTES

1 https://www.invicta.fr/fr/les-poeles-a-bois/poeles-a-bois-raccordables-etanches/poele-a-bois-etanche-wabi

RÉSUMÉS

Français

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'influence sur les émissions et les performances d'un appareil de différents paramètres, comme l'humidité du bois, la présence d'écorce ou non, le calibre utilisé ainsi que le mode d'allumage. De nombreux résultats ressortent de cette étude. Tout d'abord, tous ces paramètres influent de manière considérable sur les émissions des appareils, notamment les émissions de particules, et ce, même à régime nominal. La présence d'écorce modifie la composition en carbone total des particules totales et implique l'émission d'un nouveau type de particule : les nano-cristaux. Une humidité élevée induit des niveaux de températures plus faibles. Ainsi, les émissions d'imbrûlés gazeux tels que les Composés Organiques Volatils vont augmenter de manière importante. Les émissions de particules, en quantité et en composition chimique, sont aussi significativement impactées par l'humidité du combustible. Deux modes d'allumage ont aussi été étudiés. Il s'avère qu'un allumage inversé permet de réduire de manière significative la globalité des émissions par rapport à un allumage classique. En effet, seules les émissions de Carbone Elémentaire sont plus importantes avec un allumage inversé.

English

The aim of this study is to bring to light the influence on firewood emissions and performance of several parameters like the moisture content of the fuel, the presence of bark, the caliber of the fuel but also the ignition mode. Many results emerge from this study. First of all, all these parameters significantly impact the emissions of the firewood at the nominal thermal heat output, especially the particles emissions. The presence of bark modifies the particles composition in total carbon. Moreover, the presence of bark induces the emissions of a new family of particles: the nanocrystal. A high moisture of the fuel led to a lower temperature in the combustion chamber. Then, the emissions of unburned gases, like the Volatile Organic Compounds, will considerably increase. The particles emissions and the composition of those particles were also significantly impacted by the moisture of the fuel. Two ignition modes were also studied. It appears that the top-down ignition against the traditional ignition allowed a significant decrease of all the emissions. Nevertheless, the elemental carbon emissions were more important with a top-down ignition.

INDEX

Mots-clés
allumage, caractéristiques du combustible., chauffage domestique au bois, HAP, particules, poêle à bûches

Keywords
domestic wood heating, firewood, fuel characteristics., ignition, PAH, particles

AUTEURS

Benoît Brandelet
Laboratoire d'Études et de Recherches sur le MAtériau Bois (LERMAB), 27 rue Philippe Seguin, 88000 Epinal, France
Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) 20 avenue du Grésillé, 49004 Angers, CEDEX 01, France
benoit.brandelet (at)univ-lorraine.fr

Christophe Rose
Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) Rue d'Amance, 54280 Champenoux, France

Julien Landreau
Centre d'Essais et de Recherche des Industries de la Cheminée (CERIC), Groupe Poujoulat, 79270 Saint-Symphorien, France

Caroline Rogaume
Laboratoire d'Études et de Recherches sur le MAtériau Bois (LERMAB), 27 rue Philippe Seguin, 88000 Epinal, France

Lionel Druette
Centre d'Essais et de Recherche des Industries de la Cheminée (CERIC), Groupe Poujoulat, 79270 Saint-Symphorien, France

Yann Rogaume
Laboratoire d'Études et de Recherches sur le MAtériau Bois (LERMAB), 27 rue Philippe Seguin, 88000 Epinal, France