

QUALICOMB

REDUCTION A LA SOURCE DES EMISSIONS ISSUES DU CHAUFFAGE
DOMESTIQUE AU BOIS PAR USAGE DE COMBUSTIBLES DE QUALITE

Avril 2016

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : *POUJOLAT (Laboratoire CERIC), Université de Lorraine-
LERMAB, Cheminées SEGUIN DUTERIEZ et D2I-Groupe INVICTA*
N° de contrat : 1301C0049

Coordination technique : *PROHARAM Florence – AIT MADEN Justine*
Direction Productions et Energies Durables
Service Bioressources



RAPPORT FINAL

REMERCIEMENTS

Benoît BRANDELET (Université de Lorraine – LERMAB), Aymeric DE GALEMBERT (Cheminées SEGUIN DUTERIEZ), Lionel DRUETTE (POUJOLAT – Laboratoire CERIC), Julien LANDREAU (POUJOLAT – Laboratoire CERIC), Serge POSTEL (D2I – INVICTA), Caroline ROGAUME (Université de Lorraine – LERMAB).

CITATION DE CE RAPPORT

Julien LANDREAU ; Caroline ROGAUME 2016.- QUALICOMB Réduction à la source des émissions issues du chauffage domestique au bois par usage de combustible de qualité - Rapport final. ADEME. 487 pages.

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.

Table des matières

Table des figures.....	5
Index des tableaux.....	5
Résumé.....	6
1. Contexte du projet	7
1.1. Contexte environnemental et enjeux.....	7
1.1.1. Problématique Santé environnement.....	7
1.1.2. Contexte économique	8
1.2. Etat de l'art.....	8
2. Méthodologie.....	9
2.1. Recensement des qualités de combustibles bois bûches présentes sur le marché et choix des qualités à tester.....	9
2.2. Caractérisation des combustibles	9
2.3. Mesure des performances des appareils (deux appareils représentatifs du marché) obtenues avec les combustibles retenus.....	10
2.3.1. Choix des paramètres et niveaux retenus.....	10
2.3.2. Appareils utilisés.....	12
2.3.3. Réalisation du plan d'expériences de type TAGUCHI.....	13
2.3.4. Mesures.....	15
2.3.4.1. Détail des essais de combustion en conditions normalisées	15
2.3.4.2. Détail des essais de combustion en conditions réelles	16
2.3.4.3. Détail des essais de combustion approfondis (LERMAB)	17
2.3.5. Protocole d'essais (détails et particularités)	18
3. Bilan / Principaux résultats obtenus.....	19
3.1. Recensement des qualités de combustibles bois bûches présentes sur le marché	19
3.1.1. Les caractéristiques techniques des produits certifiés	19
3.1.2. Les produits disponibles sur le marché	19
3.1.3. Choix des niveaux retenus pour les paramètres liés au combustible	21
3.2. Caractérisation des combustibles	22
3.3. Mesure des performances des appareils	23
3.3.1. Campagne 1 : SEGUIN DUTERIEZ – Allumage à chaud / Tirage régulé.....	23
3.3.2. Campagne 2 : D2I – Allumage à chaud / Tirage régulé	23
3.3.3. Campagne 3 : CERIC.....	24
3.3.4. Campagne 4 : LERMAB	25

3.4.	Analyses du plan d'expériences	26
3.4.1.	Réussite du plan d'expériences et reproductibilité.....	26
3.4.2.	Interprétation des graphiques	27
3.4.3.	Réponse l'	32
3.5.	Essais approfondis – Campagne LERMAB	36
3.5.1.	Composés Organiques Volatils totaux et Méthane.....	36
3.5.2.	Comparaison des différentes méthodes de mesure de particules fines.....	37
3.5.3.	Analyse des HAP	38
3.6	Composition en Carbone Élémentaire et Carbone Organique.....	39
4.	Recommandations.....	40
5.	Conclusions et perspectives	42
5.1.	Conclusions.....	42
5.2.	Perspectives.....	42
	Références bibliographiques	44
	Sigles et acronymes	45
	Annexes	46

Table des figures

FIGURE 1 - DEROULEMENT DU PROJET.....	9
FIGURE 2 - MONTAGE ESSAIS FOYER	15
FIGURE 3 - MONTAGE ESSAIS POELE	16
FIGURE 4 - ESSAIS REELS.....	16
FIGURE 5 - DENSITE ENERGETIQUE DES ESSENCES DE BOIS	20
FIGURE 6 - EXEMPLES DE CHARGES FEUILLU AVEC ECORCE ET RESINEUX SANS ECORCE	21
FIGURE 7 - EXEMPLE D'ANALYSE GRAPHIQUE DE PLAN D'EXPERIENCES	27
FIGURE 8 - INFLUENCE DES PARAMETRES SUR L'APPAREIL RECENT	28
FIGURE 9 - INFLUENCE DES INTERACTIONS SUR L'APPAREIL RECENT.....	28
FIGURE 10 - INFLUENCE DES PARAMETRES SUR L'APPAREIL ANCIEN	29
FIGURE 11 - INFLUENCE DES INTERACTIONS SUR L'APPAREIL ANCIEN.....	29
FIGURE 12 - ECART DE TSP ENTRE NIVEAU 2 ET NIVEAU 1 POUR L'APPAREIL NOUVELLE GENERATION ET L'APPAREIL ANCIENNE GENERATION	30
FIGURE 13 - INFLUENCE DES PARAMETRES SUR LES TSP	31
FIGURE 14 - INFLUENCE DES INTERACTIONS SUR LES TSP	31
FIGURE 15 - REPONSE I'	32
FIGURE 16 - INFLUENCE DES PARAMETRES SUR L'APPAREIL RECENT	32
FIGURE 17 - INFLUENCE DES INTERACTIONS SUR L'APPAREIL RECENT.....	33
FIGURE 18 - INFLUENCE DES PARAMETRES SUR L'APPAREIL ANCIEN	33
FIGURE 19 - INFLUENCE DES INTERACTIONS SUR L'APPAREIL ANCIEN.....	34
FIGURE 20 - INFLUENCE DES PARAMETRES SUR L'INDICE I'	35
FIGURE 21 - INFLUENCE DES INTERACTIONS SUR L'INDICE I'	35

Index des tableaux

TABLEAU 1 - PARAMETRES ETUDIES	11
TABLEAU 2 - DEFINITION DES NIVEAUX ASSOCIES AUX PARAMETRES	13
TABLEAU 3 - DETAIL DU PLAN D'EXPERIENCES	14
TABLEAU 4 - EXPERIENCES REALISEES PAR LE LERMAB	15
TABLEAU 5 - ANALYSES DES COMBUSTIBLES.....	22
TABLEAU 6 - RESULTATS CAMPAGNE 1	23
TABLEAU 7 - RESULTATS CAMPAGNE 2	23
TABLEAU 8 - RESULTATS POELE CAMPAGNE 3	24
TABLEAU 9 - RESULTATS INSERT CAMPAGNE 3	24
TABLEAU 10 - RESULTATS CAMPAGNE 4	25
TABLEAU 11 - REPRODUCTIBILITE EXP 01 ET 29	26
TABLEAU 12 - REPRODUCTIBILITE EXP 18 ET 30	26
TABLEAU 13 - CLASSIFICATION DES INFLUENCES	30
TABLEAU 14 - MESURES EN COV _T ET CH ₄ CORRIGES A 13 % D'O ₂	36
TABLEAU 15 - MESURES DE PARTICULES FINES PAR IMPACTION MANUELLE	37
TABLEAU 16 - MESURES DE PARTICULES FINES PAR ELPI.....	37
TABLEAU 17 - HAP	38
TABLEAU 18 - CARBONE ORGANIQUE.....	39

Résumé

Dans un contexte de valorisation des énergies renouvelables et de réduction des émissions polluantes (particules, ...), l'évolution technique des appareils de chauffage au bois domestique permet aujourd'hui de proposer des systèmes de plus en plus performants. Le renouvellement du parc d'appareils est d'ailleurs une piste privilégiée d'amélioration de la qualité de l'air. Cependant, comme pour toute combustion, les performances de ces systèmes sont aussi liées à la qualité du combustible utilisé, alors que ce même combustible, naturel, est peu standardisé (au contraire des appareils de chauffage au bois).

Le projet QUALICOMB a pour but d'évaluer l'impact de la qualité du combustible bois bûches sur la combustion.

Les objectifs de cette étude sont donc de :

- Mettre en évidence la prépondérance du choix et de la qualité du combustible sur les émissions des appareils de chauffage au bois en fonctionnement réel au travers d'essais réalisés dans des appareils indépendants représentatifs du marché ;
- Permettre d'apporter des pistes de progrès concrètes complémentaires aux améliorations techniques qu'apportent déjà les fabricants d'appareils de chauffage au bois en identifiant des combustibles permettant d'optimiser les performances environnementales et énergétiques des appareils. Ainsi, un argumentaire scientifique étayé permettrait de soutenir le développement des filières de ces combustibles sur le marché et auprès des utilisateurs d'appareils de chauffage au bois indépendants ;
- Quantifier l'écart obtenu entre des mesures effectuées en conditions normalisées et des utilisations faites par les utilisateurs avec différentes qualités de combustibles.

Les résultats de cette étude mettent en évidence l'impact fort de l'humidité du combustible (même pour des valeurs inférieures à 30%) ou du couple allumage/tirage, mais aussi, dans une moindre mesure, celui de paramètres « secondaires » comme le calibre, ou la présence d'écorce.

Abstract

(Résumé en anglais)

In a context of development of renewable energy and reduction of pollutant emissions (particles ...), the technical development of domestic wood heating appliances allows to design systems that are more and more efficient. Hence, the renewal of the old wood heaters in use is a good means for improving air quality. However, as with any combustion, the combustion quality of these systems is also linked to the quality of the fuel.

The objectives of this study are:

- To show the preponderance of the choice and the quality of the wood fuel on emissions from heating appliances,
- To allow to identify the best wood fuel used to optimize energy and environmental performance of the wood stoves and heaters,
- To quantify the gap between measurements obtained in standard conditions and uses made by users with different fuel qualities.

The results of this study highlight the strong impact of fuel moisture (even for 30% lower values), but also of "secondary" parameters such as the size or the presence of bark.

1. Contexte du projet

Le développement des énergies renouvelables a été largement encouragé afin de participer à l'atteinte des objectifs assignés par le protocole de Kyoto. Parmi ces énergies, la biomasse occupe une large part, surtout dans le secteur du chauffage domestique. Cependant, même si le bilan carbone est faible pour ces combustibles, d'autres composés polluants peuvent être rejetés lors de leur combustion et peuvent ainsi présenter des dangers connus pour l'environnement et la santé : particules fines, hydrocarbures aromatiques polycycliques, benzène, ... ; constat : 65 % des émissions de particules fines de type PM 2,5 de la combustion proviennent de la combustion du bois majoritairement domestique selon le rapport SECTEN 2012 [1]. Les émissions de monoxyde de carbone représentaient quant à elles 3 985 kt en France en 2010.

Or, aujourd'hui 85 % du bois énergie est utilisé dans les appareils domestiques indépendants. Si la réglementation relative aux rendements et contrôles périodiques des chaudières de fortes puissances est bien suivie, le réel défi aujourd'hui reste les installations domestiques de petites puissances. Le parc du chauffage domestique au bois était de 5,7 millions de logements en 2006, 7,4 millions en 2012 [2]. Le Grenelle de l'Environnement prévoit pour 2020 une augmentation des installations jusqu'à atteindre 9 millions de logements équipés, à consommation de combustible égale.

La mise en place de labels attestant des bonnes performances des appareils (label Flamme Verte), est une première étape mais doit être complétée pour réduire les émissions atmosphériques dues à la combustion domestique du bois tout en améliorant les rendements énergétiques. En effet, outre les performances intrinsèques de conception, de dimensionnement et de réglages de ces appareils, le type de combustible utilisé en conditions réelles chez les particuliers et la qualité du combustible sont des paramètres déterminants pour l'optimisation des facteurs d'émission du chauffage domestique au bois. En effet, la qualité du combustible utilisé par les particuliers est très différente de celle utilisée par les industriels et les laboratoires lors de la qualification de performances des appareils.

1.1. Contexte environnemental et enjeux

1.1.1. Problématique Santé environnement

Au niveau national, la mise en place du Plan Particules dans le cadre du PNSE2 vise une diminution de 30 % des émissions de PM 2,5 d'ici 2015 (sur la base des émissions de 2010) pour atteindre une concentration moyenne de 15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ dans l'air ambiant. Ce contexte exigeant oblige une réflexion sur la réduction des émissions à la source et l'optimisation du fonctionnement des appareils indépendants de combustion bois. Dans ce contexte, les normes concernant les appareils de chauffage domestique au bois sont actuellement en cours de révision et feront l'objet d'une caractérisation réglementaire des émissions de particules fines émises lors de la combustion.

La considération des émissions de particules fines n'est pas nouvelle, notamment au travers du label Flamme Verte. Ce label a été créé en 2000 par l'ADEME et des fabricants d'appareils domestiques pour promouvoir l'utilisation d'appareils de chauffage au bois performants. Les produits labellisés répondent à des exigences techniques élevées en termes de rendement énergétique et d'émissions polluantes, qui sont, pour les appareils indépendants à bûches :

- a. Rendement égal ou supérieur à 70 % ;
- b. Taux de CO inférieur ou égal à 0,3% ;
- c. Émissions de particules fines inférieures ou égales à 90 mg/Nm^3 ;
- d. Calcul d'un indice de performance environnementale tenant compte des particules fines et permettant un classement de l'appareil selon un nombre d'étoiles obtenues (de 5 à 7).

Or, ces performances sont garanties avec le combustible normalisé, sans quoi le rendement des appareils de chauffage peut chuter (de l'ordre de 10 points de rendement perdus) et les émissions dans l'air peuvent augmenter. Ce qui présente un impact important à la fois sur les performances du chauffage, les émissions de polluants, mais aussi sur la consommation des ressources (consommation de bois supplémentaire pour atteindre un confort similaire).

Enfin, la connaissance de la nature du carbone (élémentaire/suie ou organique) émis par la combustion du bois est également majeure puisque des études récentes ont montré que le carbone suie présente des effets particulièrement néfastes sur la santé humaine [3].

1.1.2. Contexte économique

La hausse du prix des énergies fossiles tend à augmenter l'utilisation d'énergies alternatives telles que le bois. Cependant, malgré les préconisations des fabricants de poêles et d'inserts sur la qualité des combustibles, l'utilisation de combustible bois certifié (NF 444 Bois de chauffage catégorie H1 G1) reste minoritaire. Sur 40 Millions de mètres cubes de bois consommés annuellement en France, seulement 250 000 mètres cubes, soit moins de 1%, sont certifiés NF (dont la majorité de classe d'humidité H2). La qualité du combustible bois n'est donc pas actuellement un critère de choix premier pour les consommateurs.

En l'état actuel de nos connaissances techniques et de nos capacités industrielles, il est désormais envisageable d'utiliser des combustibles bois bûche calibrés ou des briquettes de bois aux caractéristiques maîtrisées. En effet, les séchoirs industriels permettent d'abaisser l'humidité du bois sous 20% et des fendeuses permettent d'obtenir des bûches au calibre souhaité. Les briquettes de bois ont quant à elles des humidités de l'ordre de 10% et ont fréquemment une composition sans additif (100% bois / sans écorce). Ainsi, l'offre et la diversité des combustibles sur le marché sont réelles dans le contexte actuel et il semble important de caractériser les facteurs d'émissions obtenus par l'utilisation de ces nouveaux types de combustible afin de montrer le cas échéant leur intérêt environnemental et énergétique.

1.2. Etat de l'art

Des études, mettant en évidence l'importance des caractéristiques du combustible bois sur la qualité de combustion [4], ont déjà été effectuées. Des pays comme l'Allemagne accordent d'ailleurs une grande importance à la qualité du combustible bois utilisé dans les appareils domestiques. D'autres travaux montrent l'importance de la considération de l'humidité du combustible sur les émissions de polluants [5] ou de la présence ou non d'écorce [6]. Il semble donc admis que la qualité du combustible a une influence directe sur la qualité de sa combustion.

Connaître l'impact réel de la qualité du combustible bois sur sa combustion dans les appareils domestiques récents serait un atout important pour sa valorisation. Mesurer les performances de ces combustibles usuels permettrait aux industriels de préconiser un combustible adapté aux poêles, foyers fermés et inserts qui limiterait les émissions de polluants tout en optimisant les performances des appareils de chauffage au bois.

Dans le cadre d'une étude ADEME (2008) [7], le LERMAB a étudié entre autres l'influence de l'humidité du combustible sur les performances énergétiques et environnementales des appareils de combustion indépendants. Il en ressort qu'une humidité du combustible élevée (25 % voire 33 %) a pour conséquence d'augmenter les facteurs d'émission des polluants mesurés (CO, NOx, PM 10 et PM 2.5, COVT, Méthane, HAP) par rapport à l'utilisation d'un combustible à humidité normalisée de 16 % en foyer fermé. En revanche, la combustion d'un combustible d'humidité de 33 % en foyer fermé est globalement moins polluante que celle à 25 % sauf pour les COVT, le méthane et les HAP. De plus, on note que l'influence de la quantité d'air introduite pour assurer la combustion varie de manière significative selon l'humidité du combustible sur les émissions polluantes.

D'après les études citées précédemment les caractéristiques à optimiser devraient être les suivantes :

- Humidité du combustible,
- Section du combustible,
- Essence de bois,
- Présence d'écorce.

2. Méthodologie

Le programme scientifique de ce projet s'articule autour de quatre axes qui partent de l'analyse de l'existant (recensement des qualités de combustible), pour poursuivre par la caractérisation des combustibles qui sont utilisés pour les essais et tests, et enfin terminer par l'exploitation des résultats d'essais et la communication des conclusions.

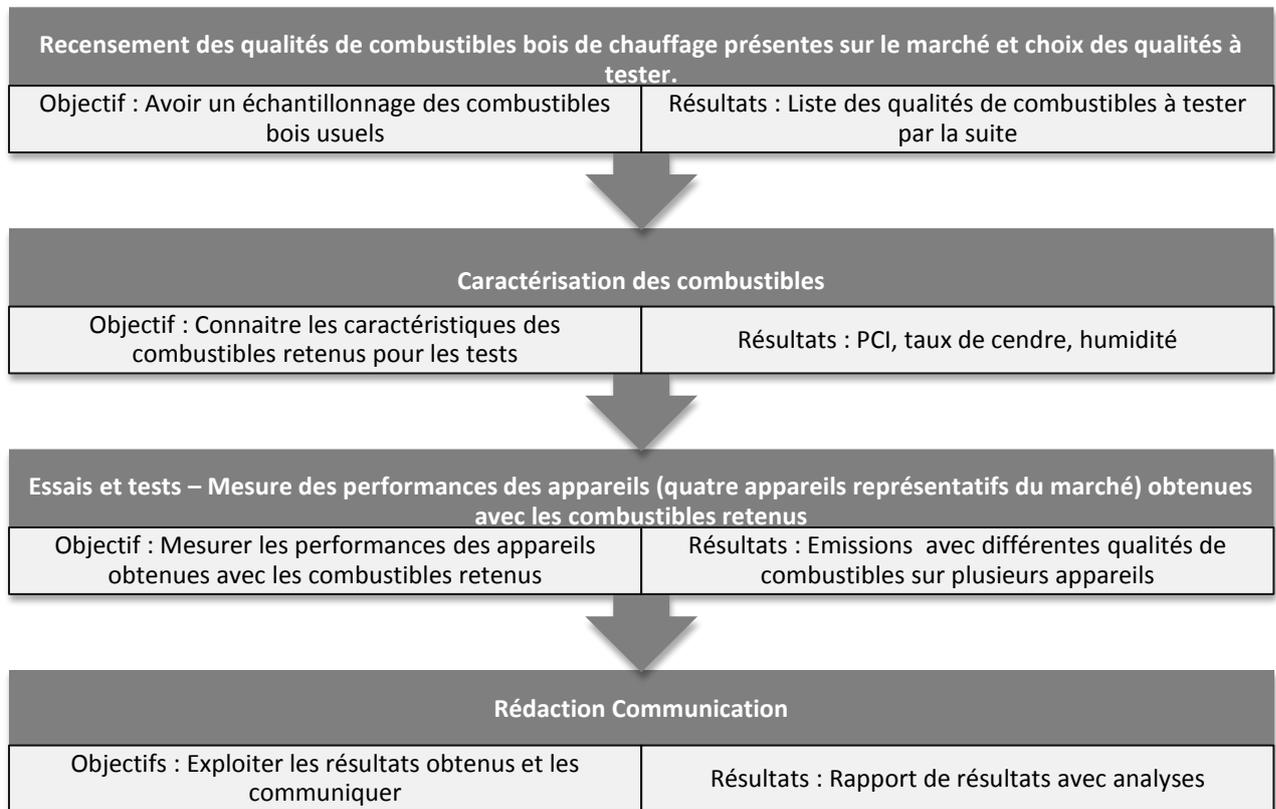


Figure 1 - Déroulement du projet

2.1. Recensement des qualités de combustibles bois bûches présentes sur le marché et choix des qualités à tester.

Ce recensement a pour objectif de faire un état des lieux des :

- Ressources disponibles en bois de chauffage ;
- Types d'appareils utilisés par les consommateurs et leurs pratiques ;
- Caractéristiques des combustibles bois bûches disponibles sur le marché.

Ce recensement permet de définir les niveaux des paramètres utilisés pour la réalisation du plan d'expériences de manière pertinente.

2.2. Caractérisation des combustibles

Différents combustibles (utilisés pour les essais) sont caractérisés : mesure du PCI, du taux de cendres, de l'humidité ainsi que de la composition chimique élémentaire (C, H, O, N, S) permettant de différencier les caractéristiques de combustibles.

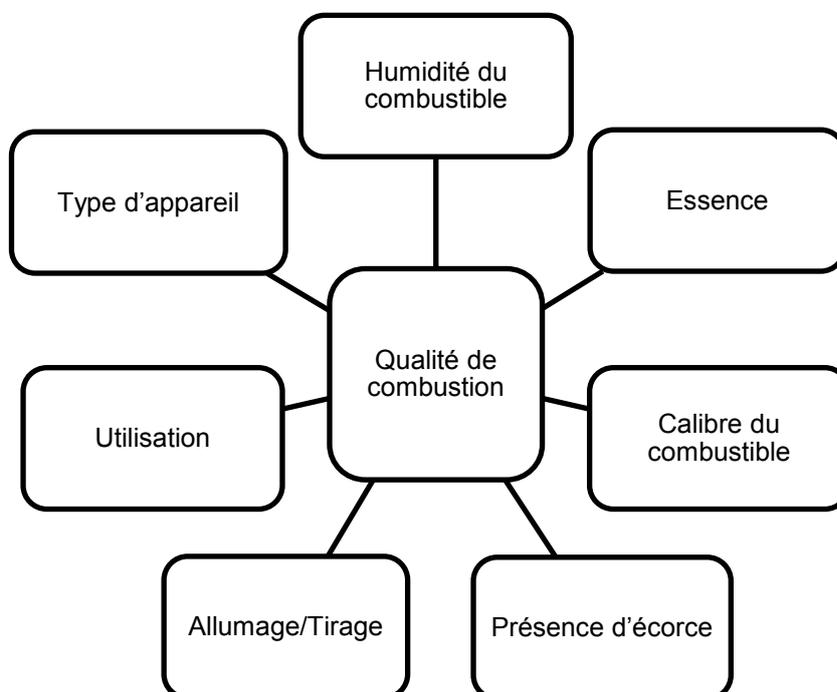
2.3. Mesure des performances des appareils (deux appareils représentatifs du marché) obtenues avec les combustibles retenus

Un plan d'expérience est réalisé de manière à pouvoir évaluer les facteurs d'influence de 7 paramètres retenus.

Au début de l'étude, 4 appareils sont testés (2 appareils de nouvelle génération labellisés Flamme Verte 5* et 2 appareils de chauffage d'ancienne génération moins performants). A la suite de ces premiers essais et au regard des premiers résultats, un appareil de chaque type est conservé pour la réalisation du plan d'expériences complet.

2.3.1. Choix des paramètres et niveaux retenus

7 paramètres influents sont retenus pour cette étude. Ils prennent principalement en compte les caractéristiques du combustible, mais aussi le type d'appareil, l'utilisation et le couple allumage/tirage.



Les niveaux des paramètres (combustibles) retenus pour cette étude ont préalablement été définis en fonction des ressources locales et des produits disponibles pour les usagers.

- L'essence : Les pays nordiques utilisent principalement des résineux au contraire de notre marché qui privilégie les feuillus. Il semble donc intéressant de comparer les deux groupes d'essences dans cette étude.
- L'humidité : L'humidité des bûches utilisées par les consommateurs semble en partie supérieure à celle préconisée par les fabricants. Deux niveaux d'humidité sont retenus pour les expériences.
- Le calibre : Les fabricants d'appareils préconisent des charges précises (en masse et en nombre de quartiers). Cependant, dans la pratique, un gros quartier est souvent privilégié à une charge fendue. Ces deux pratiques sont donc évaluées.
- La présence d'écorces : Certains producteurs de bois de chauffage proposent des bûches « sans écorce ». L'objectif est donc d'en mesurer l'intérêt.

Les paramètres étudiés et les niveaux retenus sont les suivants :

Tableau 1 - Paramètres étudiés

Niveau	Humidité	Essence	Calibre	Ecorce
1	< 20 % (bois sec)	Feuille dur (préférences utilisateur)	2 Quartiers (préconisations fabricants)	Sans
2	< 30 % (bois partiellement séché)	Résineux (ressources disponibles – pratiques pays nordiques)	1 Quartier (pratique utilisateurs)	Avec

Remarque : l'humidité du bois est contrôlée avant chaque essai de manière à respecter un maximum de 30 % pour les charges humides.

A ces paramètres viennent s'ajouter ceux liés à l'utilisateur et à l'installation de chauffage :

- Allumage/Tirage : 1 (Chaud/régulé) 2 (A froid/Naturel)
 - Le tirage naturel est obtenu avec une installation traditionnelle de 4 mètres comprenant un conduit de raccordement et un conduit de fumée isolé. Aucun régulateur de tirage n'est utilisé.
- Utilisation : 1 (Bonne) 2 (Mauvaise)
 - La bonne utilisation est obtenue en respectant les instructions fournies par le fabricant de l'appareil de chauffage au bois. La mauvaise consiste à réduire l'apport en air par rapport au réglage préconisé (position fixée lors des premiers essais). **Les réglages prédéfinis restent identiques pour l'ensemble des expériences**, ceci malgré la dégradation visuelle de la combustion qui aurait en cas réel incité l'utilisateur à intervenir ou à ajuster les réglages. Cette interdiction d'intervention a pour but de respecter scientifiquement le protocole visant à l'application stricte du plan d'expériences tel que défini par la méthodologie Taguchi.
- Appareil : 1 (Appareil nouvelle génération avec Flamme verte 5*) 2 (Vieil appareil de chauffage)
 - L'appareil nouvelle génération est de plus faible puissance pour respecter les évolutions des besoins de chauffage dans l'habitation.
 - L'appareil ancienne génération est volontairement choisi sans double combustion de manière à être représentatif de la catégorie d'appareils d'ancienne technologie toujours présents sur le parc.

2.3.2. Appareils utilisés

Les appareils retenus pour l'étude sont les suivants :

Foyer modèle SUNFLAM ancienne génération	Poêle modèle SAPHIR
	
Puissance = 12 KW Rendement = 73,2 % CO (à 13% d'O2) = 0,25% Température de fumée = 302°C	Puissance = 9 KW Rendement = 79 % CO (à 13% d'O2) = 0,11% Température de fumée = 322°C

Poêle ancien modèle VOLGA	Poêle modèle WABI
	
<u>Valeurs déclarées :</u> Puissance = 10 kW Rendement = 70,0 % CO (à 13% d'O2) = 0,3% Température de fumée = 261°C	<u>Valeurs déclarées :</u> Puissance = 6 kW Rendement = 79 % CO (à 13% d'O2) = 0,05% Température de fumée = 282°C

Pour chaque appareil, les réglages de bonne utilisation sont définis de manière à se rapprocher des réglages utilisés par les fabricants lors des essais de certification.

Les réglages de mauvaise utilisation sont définis en réduisant l'air comburant par rapport à la position idéale avec un combustible sec (sans pour autant empêcher la combustion de la bûche).

Ces réglages sont conservés malgré les dégradations visibles de certaines combustions (noircissement de la vitre, flammes peu vives). Ceci est contraire aux pratiques d'un utilisateur qui aurait adapté les réglages au comportement du feu, mais il est nécessaire dans le cadre de la réalisation du plan d'expériences.

2.3.3. Réalisation du plan d'expériences de type TAGUCHI

Les essais sont initialement définis de manière à respecter le plan d'expériences de type L16 TAGUCHI. Des essais y sont ajoutés de manière à gagner en précision d'analyse mais également pour vérifier la répétabilité inter-laboratoire de certaines configurations.

Les avantages de l'utilisation de ce type de plan d'expériences sont de pouvoir :

- Mettre en évidence et quantifier l'influence des paramètres pris en compte sur une ou plusieurs réponses ;
- Pouvoir étudier un grand nombre de paramètres sans pour autant réaliser la totalité des combinaisons possibles.

Les limites liées à l'utilisation de ce plan d'expériences sont :

- Un risque d'oubli d'un facteur influant (le bruit lié à l'oubli d'un facteur influant peut rendre inexploitable le tableau de réponse) ;
- Contrairement aux pratiques, l'influence de l'opérateur doit être minimisée pour éviter justement d'ajouter un facteur non maîtrisé par le plan d'expériences. L'opérateur d'essais ne doit donc pas se placer en tant qu'utilisateur. Il ne doit pas adapter ses actions à ses observations. Une combustion visiblement dégradée ne doit pas entraîner un ajustement des réglages de l'appareil de sa part. De la même façon, l'utilisation de bois humide ne doit pas être compensée par la génération d'un lit de braise plus élevé.

C'est pourquoi :

- Les expériences réalisées ne sont **en aucun cas des scénarios d'utilisation typiques** ;
- Les interprétations ne sont possibles qu'à partir des facteurs d'impact (paramètres seuls et interactions) ;
- Les résultats de chaque expérience ne peuvent pas être utilisés pour déterminer des facteurs d'émissions. Ils ne doivent pas être interprétés individuellement. L'argumentation est donc qualitative et non quantitative.

Tableau 2 - Définition des niveaux associés aux paramètres

Niveau	Humidité	Essence	Calibre	Ecorce	Allumage/Tirage	Utilisation	Appareil
1	< 20 %	Feuillus	2 bûches	Sans	Chaud/régulé	Bonne	Poêle récent FV5*
2	< 30 %	Résineux	1 bûche	Avec	Froid/naturel	Dégradée	Insert ancien

Le détail des expériences réalisées est donné ci-dessous :

Tableau 3 - Détail du plan d'expériences

	Plateforme	N° pl exp	Appareil	Allumage/Tirage	Humidité	Calibre	Ecorce	Essence	Utilisation
L16 TAGUCHI	Fabricant (x2)	Exp 01	1	1	1	1	1	1	1
	CERIC	Exp 02	1	1	1	2	2	2	2
	CERIC	Exp 03	1	1	2	1	1	2	2
	Fabricant (x2)	Exp 04	1	1	2	2	2	1	1
	CERIC	Exp 05	1	2	1	1	2	1	2
	CERIC	Exp 06	1	2	1	2	1	2	1
	CERIC	Exp 07	1	2	2	1	2	2	1
	CERIC	Exp 08	1	2	2	2	1	1	2
	Fabricant (x2)	Exp 09	2	1	1	1	1	1	2
	CERIC	Exp 10	2	1	1	2	2	2	1
	CERIC	Exp 11	2	1	2	1	1	2	1
	CERIC	Exp 12	2	1	2	2	2	1	2
	CERIC	Exp 13	2	2	1	1	2	1	1
	CERIC	Exp 14	2	2	1	2	1	2	2
	CERIC	Exp 15	2	2	2	1	2	2	2
	CERIC	Exp 16	2	2	2	2	1	1	1
Essais complémentaires	Fabricant (x2)	Exp 17	2	1	1	1	1	1	1
	CERIC	Exp 18	2	2	2	2	2	2	2
	CERIC	Exp 19	1	1	1	1	1	2	1
	Fabricant (x2)	Exp 20	2	1	1	1	1	2	1
	Fabricant (x2)	Exp 21	1	1	1	1	2	1	1
	CERIC	Exp 22	2	1	1	1	2	1	1
	CERIC	Exp 23	1	1	1	1	2	2	1
	CERIC	Exp 24	2	1	1	1	2	2	1
	Fabricant (x2)	Exp 25	1	1	1	1	1	1	2
	Fabricant (x2)	Exp 26	2	1	1	1	1	1	2
	CERIC	Exp 27	1	2	1	1	1	1	1
	CERIC	Exp 28	2	2	1	1	1	1	1

Suite à l'analyse des premiers résultats, 10 expériences supplémentaires sont réalisées par le LERMAB. L'objectif de ces essais est alors d'affiner les résultats, vérifier la répétabilité et compléter le plan d'expériences.

Tableau 4 - Expériences réalisées par le LERMAB

	Plateforme	N° pl exp	Appareil	Allumage/Tirage	Humidité	Calibre	Ecorce	Essence	Utilisation
Essais réalisés pour affiner les résultats	LERMAB	Exp 29	1	1	1	1	1	1	1
	LERMAB	Exp 30	2	2	2	2	2	2	2
	LERMAB	Exp 31	1	1	2	1	1	1	1
	LERMAB	Exp 32	1	1	1	2	1	1	2
	LERMAB	Exp 33	1	1	2	2	1	1	2
	LERMAB	Exp 34	1	1	2	1	1	1	2
	LERMAB	Exp 35	1	1	2	1	2	1	1
	LERMAB	Exp 36	2	1	2	2	2	1	1
	LERMAB	Exp 37	2	1	2	2	1	1	2
	LERMAB	Exp 38	2	2	1	1	1	1	2

2.3.4. Mesures

2.3.4.1. Détail des essais de combustion en conditions normalisées

La combustion de différentes qualités de combustible est réalisée dans plusieurs appareils indépendants représentatifs du marché, par leurs fabricants, dans les conditions de tirage régulé. Les qualités de combustibles varient d'après le plan d'expérience proposé.

Les mesures effectuées sont les suivantes :

Rendement, Puissance, Carbone Élémentaire / Organique, CO, CO₂, O₂, Particules fines, Prélèvements Carbone Élémentaire (Carbone Suie) / Carbone Organique.



Figure 2 - Montage essais foyer



Figure 3 - Montage essais poêle

2.3.4.2. Détail des essais de combustion en conditions réelles

La combustion des différentes qualités de combustibles en conditions de tirage naturel est réalisée principalement au laboratoire CERIC dans deux appareils indépendants représentatifs du parc d'appareils et de ses évolutions. Ces appareils ont été choisis parmi les quatre testés précédemment par les fabricants, de manière à conserver un appareil performant et un d'ancienne génération. Les performances observées lors des premiers essais ont déterminé le choix de ces modèles. Les paramètres d'utilisation sont aussi des variables étudiées (surpuissance, manque d'air) pour mettre en évidence les différences entre le protocole d'essai normalisé et la pratique de l'utilisateur (qui suit ou non la notice d'utilisation), ainsi que la caractérisation du mode d'allumage par départ à froid ou départ selon les conditions de la norme NF EN 13229 ou NF EN 13240.

Les mesures effectuées sont les suivantes :

Rendement, Puissance, Carbone Élémentaire / Organique, CO, CO₂, O₂, Particules fines, Prélèvements Carbone Élémentaire (Carbone Suie) / Carbone Organique, Tirage.



Figure 4 - Essais réels

2.3.4.3. Détail des essais de combustion approfondis (LERMAB)

La combustion des différentes qualités de combustible est réalisée dans les deux appareils retenus de manière à valider le plan d'expérience et de tester les conditions qui semblent les plus pertinentes. Les émissions polluantes sont mesurées et caractérisées au travers de la quantification de plusieurs composés identifiés :

- **Carbone Élémentaire (Carbone Suie) / Carbone Organique :**
Les mesures sont réalisées à partir d'aérosols condensés prélevés sur filtres quartz sur lesquels sont collectées les particules fines avec ou sans distinction de la granulométrie. L'analyseur EC/OC commercialisé par l'entreprise Sunset Laboratory Inc. mesure la concentration en méthane après combustion puis réduction de la matière carbonée. Une première séquence, dans un flux d'hélium, permet l'analyse du carbone organique. Les composés vaporisés, entraînés par le flux d'hélium, sont ensuite oxydés en CO₂ dans un four secondaire puis réduit en CH₄ dans un troisième four. Enfin, la quantité de CH₄ produite est mesurée par un détecteur à ionisation de flamme. La deuxième séquence permet l'analyse du carbone élémentaire. Elle est effectuée sous flux d'hélium et d'oxygène et suit le même protocole que celui décrit pour le carbone organique mais en atmosphère oxydante.
- **Particules fines (PM₁₀ et PM_{2,5}) :**
Il y a actuellement une réflexion au niveau européen (comité de normalisation CEN et projet européen EN-PME-TEST dans lequel le LERMAB est partenaire) sur le choix de la méthodologie de mesure des particules issues de la combustion du bois dans les appareils de chauffage qui serait unique et commune à tous les acteurs. Dans ce contexte, il semble intéressant de mesurer en parallèle par trois méthodes différentes mais complémentaires les particules fines :
 - Un prélèvement sur filtre à chaud ;
 - Un prélèvement des particules par impaction à l'aide de l'impacteur PM₁₀ de chez Dekati permettant de quantifier par pesée les 3 fractions granulométriques PM₁₀, PM_{2,5} et PM_{1,0} ;
 - Un impacteur basse pression à détection électrique ELPI de chez Dekati permettant de mesurer en temps réel la distribution de taille et de concentration de particules dispersées dans un gaz, dans une large plage comprise entre 30 nm et 10 µm par collecte sur 12 étages d'impaction. On obtient ainsi la distribution en taille d'aérosols en nombre, permettant une lecture encore différente de l'expression de la concentration en particules fines. Le prélèvement de particules pour analyse par l'ELPI peut ainsi être réalisé par le biais d'un système de dilution chauffé pour les prélèvements à l'émission lors des essais de combustion dans les appareils de chauffage au bois [8]. En effet, l'ELPI sature systématiquement pour des prélèvements réalisés à l'émission lors d'essais de combustion dans les appareils indépendants à bûches. Par précaution et par souci de comparaison, tous les prélèvements à l'émission sont menés sous dilution.
- **Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) :**
La détermination des hydrocarbures aromatiques polycycliques est réalisée selon la norme NF X43-329 [9] avec prélèvements sur filtre quartz chauffé pour les HAP particulaires, des condensats après passage des gaz sur un réfrigérant et les HAP gazeux par adsorption sur résine de type XAD-2. 16 HAP sont ainsi quantifiés : naphthalène, acénaphthylène, acénaphtène, fluorène, phénanthrène, anthracène, fluoranthène, pyrène, benzo(a)anthracène, chrysène, benzo(b)fluoranthène, benzo(k)fluoranthène, benzo(a)pyrène, dibenzo(a,h)anthracène, benzo(g,h,i)pérylène et indéno(1,2,3,c,d)pyrène.
- **Composés Organiques Volatils (COV) :** Les mesures en temps réel des COV Totaux, et différenciées du Méthane (COVnM) sont réalisées au moyen d'un analyseur Graphite 52 M de chez Environnement SA fonctionnant par chromatographie FID (par détecteur à ionisation de flamme).
- **Les gaz non condensables et paramètres de la combustion :** Les mesures en temps réel du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone, des oxydes d'azote et de l'oxygène sont effectuées par détermination électrochimique à l'aide d'un système de mesure portable (TESTO 350 XL) ainsi que la mesure de la température des fumées. La sonde de prélèvement est placée directement dans le conduit d'évacuation des fumées à une hauteur définie selon les normes en vigueur.

- La masse de bois : Une balance de type Combics 1 de chez Sartorius (capacité 600 kg, précision 20 g) est placée sous l'appareil de chauffage indépendant et permet de suivre la consommation de bois et d'en déduire la fin d'un essai normalisé.

2.3.5. Protocole d'essais (détails et particularités)

- Charges : La charge de bois est définie comme une quantité de combustible (masse anhydre) définie. C'est ainsi qu'une charge de 1,4 kg à 16 % d'humidité correspond à une charge de 1,64 kg à 28 % d'humidité. Ceci a pour objectif de comparer des charges de combustibles semblables et de ne pas faire varier deux paramètres en même temps (respect du plan d'expériences).
- Prélèvement : Le prélèvement de poussière s'effectue à partir de la fermeture de la porte sur une période complète de combustion. Le résultat de TSP prend donc en compte les premières minutes de combustion. Le prélèvement pour la mesure d'EC/OC est effectué 20 minutes après fermeture de la porte pour une durée de 10 minutes.
- Fumisterie : Le tirage naturel est obtenu avec une installation traditionnelle de 4 mètres comprenant un conduit de raccordement et un conduit de fumée isolé. La longueur du conduit de raccordement est identique à celle utilisée pour les autres montages (respect des distances définies par les normes NF EN 13229 et NF EN 13240). Aucun régulateur de tirage n'est utilisé.
- Calcul du rendement :

Le rendement de l'appareil est estimé selon le calcul de la norme NF EN 13229 et NF EN 13240.

Le rendement :

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r)$$

Les pertes par chaleur sensible :

$$q_a = \frac{100}{H_u} \times (T_a - T_r) \times \left[C_{p_{md}} \times \frac{(C - C_r)}{0,536 \times (CO + CO_2)} + \frac{C_{p_{H_2O}} \times 1,92 \times (9.H + W)}{100} \right]$$

Les pertes par chaleur latente :

$$q_b = \frac{100}{H_u} \times 12644 \times \frac{CO \times (C - C_r)}{0,536 \times (CO + CO_2) \times 100}$$

Les pertes par imbrûlés solides q_r , dans le cas de bois comme combustible, sont forfaitairement de 0,5 %.

Dans le cas des combustions incomplètes, la prise en compte de la quantité de bois réellement consommée est effectuée en pondérant le rendement par le taux consommé :

$$\text{taux consommé} = \frac{\text{masse de bois initiale} - \text{masse de bois non consommé}}{\text{masse de bois initiale}}$$

3. Bilan / Principaux résultats obtenus

3.1. Recensement des qualités de combustibles bois bûches présentes sur le marché

Les détails de cette partie sont présentés en Annexe 1.

En France, la filière commerciale du bois bûches est surtout organisée de manière locale. De nombreux producteurs vendent leur combustible directement au consommateur. Le bois bûches est dans sa majorité commercialisé sans certification, donc sans garantie de ses caractéristiques (humidité, quantité).

3.1.1. Les caractéristiques techniques des produits certifiés

Aujourd'hui, seuls six producteurs de bûches sont certifiés NF Biocombustibles solides. La production de bois bûches certifié est donc minime au regard de la consommation totale.

Les principales caractéristiques garanties par cette certification sont :

- **Les essences :**
 - G1 : chêne, charme, hêtre, frêne, érable (feuillus durs) ;
 - G2 : châtaignier, robinier faux acacia, merisier, fruitiers divers, bouleau (feuillus tendres) ;
- **L'humidité :**
 - H1 : < 20% (pour le bois prêt à consommer) ;
 - H2 : > 20% (pour le bois à faire sécher) ;
- **Les quantités ;**
- **Les longueurs.**

A l'heure actuelle, aucune notion de calibre ou de quantité d'écorces n'est abordée par ce référentiel.

3.1.2. Les produits disponibles sur le marché

Les revendeurs communiquent principalement sur des notions de volumes, d'essences et de coût. La notion d'humidité est aussi abordée mais secondairement.

Les utilisateurs semblent pourtant sensibles à l'humidité du combustible qui leur est livré. L'humidité est le troisième critère de choix cité par les consommateurs après l'essence et le prix [10]. Cependant, ces mêmes consommateurs disent utiliser du bois ayant séché moins de deux ans à hauteur de 54% (21% moins d'un an) alors qu'ils considèrent à 96% utiliser du bois sec. Il y a donc un écart entre l'idée de la qualité du combustible que se fait le consommateur et ses performances réelles.

- **L'humidité :**

Etant données les problématiques de stockage, de nombreux revendeurs livrent du bois ayant séché moins d'un an sur parc ou sans garantie d'humidité. Ceci est d'autant plus vrai que l'on avance dans la saison de chauffage, les produits secs faisant place à des coupes récentes.

Cependant, certains process industrialisés permettent aujourd'hui de proposer des bûches calibrées, séchées en étuve tout au long de la saison. Ces produits ont l'avantage de garantir des taux d'humidité et des caractéristiques de bûches maîtrisées.

- **L'essence :**

Les principales essences commercialisées pour le bois de chauffage sont les suivantes : chêne, charme, hêtre. Ces essences de feuillu dur sont privilégiées par les consommateurs en France. C'est d'ailleurs leur premier critère de choix. La combustion de ces bûches est réputée durer plus longtemps que pour du résineux, leur densité énergétique est plus importante (1 m³ de feuillu dur contient donc plus d'énergie que le même volume de résineux ou de feuillu tendre).

Des essences tendres (peuplier, pin) sont aussi parfois commercialisées. Elles sont peu utilisées comme bois de chauffage en France, mais certains pays comme la Suède, dont le parc est composé de 85% de résineux [11] (pin et épicéa) utilisent fréquemment le bois résineux comme source de bois de chauffage.

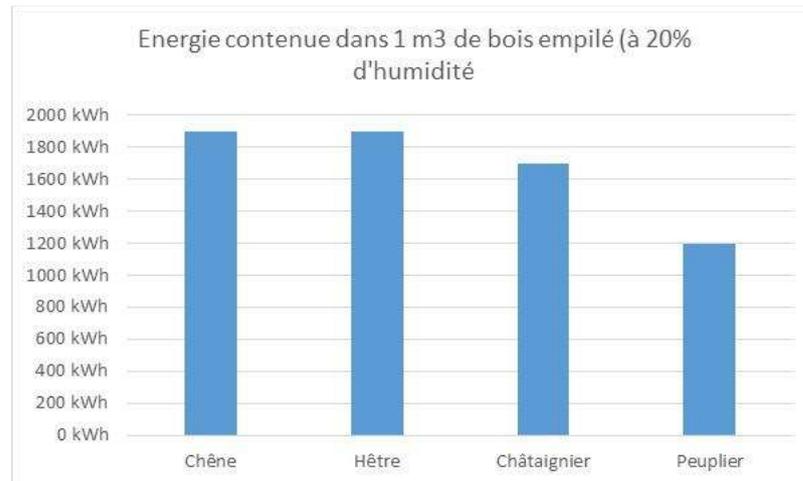


Figure 5 - Densité énergétique des essences de bois

- **La longueur :**

Aujourd'hui, la majorité du bois de chauffage est commercialisée en longueur 1 m ou 0,5 m. Cependant, pour accompagner l'évolution du marché vers des poêles, les producteurs proposent désormais des longueurs 0,4 m, 0,3 m ou même 0,25 m.

- **La section :**

La plupart des revendeurs proposent du bois fendu. Il est cependant à noter que les utilisateurs préfèrent souvent acheter du bois fendu en gros quartiers, qui leur semble plus qualitatif, alors que les poêles actuels préconisent des charges proches de 1,5 kg en deux quartiers (section de diamètre 8-10 cm).

3.1.3. Choix des niveaux retenus pour les paramètres liés au combustible

Ces constats ont permis de définir les niveaux retenus pour les paramètres du plan d'expériences :

Niveau	Humidité	Essence	Calibre	Ecorce
1	< 20 % (bois sec)	Feuille dur (préférences utilisateur)	2 Quartiers (préconisations fabricants)	Sans
2	< 30 % (bois partiellement séché)	Résineux (ressources disponibles – pratiques pays nordiques)	1 Quartier (pratique utilisateurs)	Avec

Les différents combustibles ont été préparés et associés à chacune des expériences de manière à respecter les niveaux ci-dessus.



Figure 6 - Exemples de charges feuillu avec écorce et résineux sans écorce

3.2. Caractérisation des combustibles

Plusieurs combustibles, retenus pour la réalisation du plan d'expériences, ont été caractérisés. Les résultats de ces analyses sont repris dans les tableaux ci-dessous et détaillés en annexe 2.

Tableau 5 - Analyses des combustibles

Type	Humidimètre à pointe	Humidité	PCS	PCIs	PCIh	Taux de Cendre 550°C	Taux de Cendre 815°C
	% sur sec	% sur brut	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	En % sur sec	En % sur sec
Feuille Sec Sans Ecorce	11,97	9,61	19 152	17 796	15 845	0,19	0,37
Feuille Sec Avec Ecorce	12,70	10,80	19 026	17 670	15 492	0,73	0,61
Feuille Humide Sans Ecorce	39,00	27,95	19 446	18 090	12 335	0,91	0,10
Feuille Humide Avec Ecorce	30,20	15,43	18 858	17 502	14 416	0,98	0,69
Résineux Sec Avec Ecorce	14,37	13,15	19 786	18 430	15 678	0,67	0,56
Résineux Humide Avec Ecorce	78,87	47,52	19 114	17 758	8 132	0,95	0,67

De manière générale, on observe que :

- Le taux de cendres augmente avec la présence d'écorce ;
- En moyenne, le PCIs des résineux n'est que 2 % plus élevé que celui du feuillu. L'essence n'a donc qu'une importance restreinte sur le pouvoir calorifique des bûches. Cela ne veut pas dire que la combustion des résineux est pour autant identique à celle des feuillus car d'autres facteurs entrent en jeu : différence de densité, etc.

3.3. Mesure des performances des appareils

Le plan d'expériences prédéfini a été respecté sur 3 sites (plate-forme Seguin Duteriez, plate-forme D2I, plate-forme CERIC).

Il est rappelé que :

- Les expériences réalisées ne sont **en aucun cas des scénarios d'utilisation typiques**.
- Les interprétations ne sont possibles qu'à partir des facteurs d'impact (paramètres seuls et interactions).
- Les résultats de chaque expérience ne doivent pas être interprétés individuellement.

3.3.1. Campagne 1 : SEGUIN DUTERIEZ – Allumage à chaud / Tirage régulé

Insert ancienne génération :

Tableau 6 - Résultats campagne 1

Essai	mbois init.	TSP à 13% O ₂	Combustion						
			Ttronçon	CO ₂	O ₂	CO à 13 % O ₂	Tirage	Tambiamt	η
<i>n°</i>	<i>kg</i>	<i>mg.Nm⁻³</i>	°C	%	%	<i>ppm</i>	<i>Pa</i>	°C	%
Exp 17	4,1	91,3	292,7	5,8	15,1	2 004	-12,0	29,5	62,2
Exp 9	4,1	88,6	296,6	5,7	15,0	1 303	-12,0	30,7	64,0
Exp 20	4,2	102,3	301,2	5,9	15,0	1 776	-12,0	26,2	64,3
Exp 26	4,1	87,0	298,3	5,6	15,2	1 641	-12,0	32,1	62,5

Poêle récent performant :

L'appareil n'ayant pas été retenu pour la réalisation complète du plan d'expérience, les résultats des expériences 1, 21, 25 et 4 sont donnés à titre indicatif en annexe 3.

3.3.2. Campagne 2 : D2I – Allumage à chaud / Tirage régulé

Poêle récent performant :

Tableau 7 - Résultats campagne 2

Essai	mbois init.	TSP à 13% O ₂	Combustion						
			Ttronçon	CO ₂	O ₂	CO à 13 % O ₂	Tirage	Tambiamt	η
<i>n°</i>	<i>kg</i>	<i>mg.Nm⁻³</i>	°C	%	%	<i>ppm</i>	<i>Pa</i>	°C	%
Exp 1	1,4	7,9	334,0	9,9	10,8	958	-12,0	20,5	73,6
Exp 21	1,4	14,9	341,0	10,3	10,4	1 241	-12,0	22,2	73,6
Exp 25	1,4	9,7	312,5	11,4	9,2	2 611	-12,0	22,5	77,2
Exp 4	1,4	110,7	286,0	6,6	14,2	7 182	-12,0	22,3	65,7

Insert ancienne génération :

L'appareil n'ayant pas été retenu pour la réalisation complète du plan d'expérience, les résultats des expériences 17, 9, 20 et 26 sont donnés à titre indicatif en annexe 4.

3.3.3. Campagne 3 : CERIC

Poêle récent performant (voir résultats détaillés en annexe 5) :

Tableau 8 - Résultats poêle campagne 3

Essai	mbois init.	TSP à 13 % O ₂	Combustion					Tirage	Tambiamt	η
			Ttronçon	CO ₂	O ₂	CO à 13 % O ₂				
<i>n</i> ^o	<i>kg</i>	<i>mg.Nm⁻³</i>	°C	%	%	<i>ppm</i>	<i>Pa</i>	°C	%	
Exp 01	1,4	12,9	297,1	10,6	10,5	1 076	-12,1	25,3	77,7	
Exp 02	1,4	416,9	228,1	7,1	13,7	5 473	-14,7	25,3	74,3	
Exp 03	1,6	617,7	203,9	6,9	14,1	10 605	-12,6	25,2	58,1	
Exp 19	1,4	14,2	285,6	10,0	10,9	1 962	-12,8	25,6	76,9	
Exp 23	1,4	67,0	274,0	8,7	12,1	3 392	-13,9	23,6	74,4	
Exp 05	1,4	381,6	171,1	5,5	15,2	6 744	-9,8	21,5	75,0	
Exp 06	1,4	152,3	190,6	3,7	17,0	4 253	-12,3	21,9	64,3	
Exp 07*	1,7	784,2	147,9	3,3	17,5	9 257	-12,4	21,1	32,4	
Exp 08*	1,7	560,6	94,6	3,0	17,7	9 480	-5,1	17,9	25,1	
Exp 27	1,4	85,5	235,1	5,8	14,9	4 063	-11,9	19,9	69,1	

Insert ancienne génération (voir résultats détaillés en annexe 6) :

Tableau 9 - Résultats insert campagne 3

Essai	mbois init.	TSP à 13 % O ₂	Combustion					Tirage	Tambiamt	η
			Ttronçon	CO ₂	O ₂	CO à 13 % O ₂				
<i>n</i> ^o	<i>kg</i>	<i>mg.Nm⁻³</i>	°C	%	%	<i>ppm</i>	<i>Pa</i>	°C	%	
Exp 10	4,1	128,2	262,5	5,6	15,8	4 454	-12,1	23,7	64,9	
Exp 11*	4,7	261,1	265,7	5,0	15,6	6 569	-11,9	27,9	34,4	
Exp 12*	4,7	289,2	163,6	2,4	18,5	10 230	-11,9	23,7	12,3	
Exp 22	4,1	162,0	295,0	6,5	15,0	5 017	-12,1	28,7	65,9	
Exp 24	4,1	133,1	295,0	6,5	14,5	3 599	-12,1	23,4	65,7	
Exp 17	4,1	209,6	266,1	6,3	14,5	4 193	-12,0	26,5	68,4	
Exp 13	4,1	223,2	202,3	3,8	17,2	5 322	-11,8	16,8	61,4	
Exp 14	4,1	238,6	177,6	3,4	17,2	5 813	-14,2	19,1	63,4	
Exp 15*	4,7	358,7	173,6	3,2	17,5	5 578	-10,3	22,3	26,6	
Exp 16*	4,7	451,4	128,6	2,6	18,2	6 727	-10,4	17,7	17,7	
Exp 18*	4,7	554,4	103,7	2,0	18,8	7 879	-8,9	20,1	17,4	
Exp 28	4,1	281,6	200,2	3,9	16,9	5 219	-12,2	19,9	62,9	

* Expériences pour lesquelles la combustion des bûches fut incomplète (le feu n'ayant pas pris)

3.3.4. Campagne 4 : LERMAB

Tableau 10 - Résultats campagne 4

Essai	mbois init.	TSP à 13 % O ₂	Combustion					η
			Ttronçon	CO ₂	O ₂	CO à 13 % O ₂	Tambiamt	
<i>n°</i>	<i>kg</i>	<i>mg.Nm⁻³</i>	°C	%	%	<i>ppm</i>	°C	%
Exp 29	1,4	1,9	249,3	12,1	8,9	1 636	36,4	82,29
Exp 30*	4,7	165,5	119,8	4,3	16,7	6 228	31,8	30,8
Exp 31	1,7	77,4	187,8	7,8	13,2	6 072	40,8	76,46
Exp 32	1,4	99,6	125,7	6,6	14,4	9 719	43,2	71,15
Exp 33*	1,7	18,1	126,6	4,4	16,6	12 358	37,7	23,9
Exp 34*	1,7	393,6	133,7	3,6	17,4	11 856	35,0	22,3
Exp 35	1,7	198,2	177,3	5,6	15,4	5 426	32,8	55,22
Exp 36	4,7	281,2	196,7	4,5	16,5	5 941	40,8	40,77
Exp 37*	4,7	163,7	166,6	4,1	16,9	5 791	32,3	32,45
Exp 38*	4,1	398,5	176,8	5,1	15,9	7 469	37,5	41,7

* Expériences pour lesquelles la combustion des bûches fut incomplète (le feu n'ayant pas pris)

3.4. Analyses du plan d'expériences

3.4.1. Réussite du plan d'expériences et reproductibilité

Les essais se sont très bien déroulés, ils présentent une bonne reproductibilité sur l'appareil performant (les essais de reproductibilité réalisés avec l'appareil d'ancienne génération étant plus défavorables, la reproductibilité y était moins bonne).

Les résultats obtenus sont exploitables (des tendances sont visibles) et cohérents. Les paramètres ont donc été correctement choisis.

Les protocoles d'essais ont été scrupuleusement suivis (ce qui permet de limiter le bruit qui pourrait fausser l'analyse).

Tableau 11 - Reproductibilité exp 01 et 29

	Appareil	Allumage/Tirage	Humidité	Calibre	Ecorce	Essence	Utilisation	
	1	1	1	1	1	1	1	
	TSP(mg/Nm ³ à 13 % d'O ₂)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm à 13 % d'O ₂)	Tambiant (°C)	Tfumée (°C)	η (%)	I'
Résultats LERMAB	1,87	8,94	12,06	1 636,04	36,44	249,28	82,29	0,52
Résultats INVICTA	7,88	10,76	9,90	958,00	20,50	334,00	73,63	0,44
Résultats CERIC	12,90	10,50	10,60	1 076,00	25,30	297,10	77,70	0,47

Tableau 12 - Reproductibilité exp 18 et 30

	Appareil	Allumage/Tirage	Humidité	Calibre	Ecorce	Essence	Utilisation	
	2	2	2	2	2	2	2	
	TSP(mg/Nm ³ à 13 % d'O ₂)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO (ppm à 13 % d'O ₂)	Tambiant (°C)	Tfumée (°C)	η (%)	I'
Résultats LERMAB	165,48	16,69	4,31	6 227,66	31,77	119,84	30,80	17,60
Résultats CERIC	554,40	18,80	2,00	7 879,00	20,10	103,70	17,40	97,22

3.4.2. Interprétation des graphiques

Les graphiques issus de l'analyse du plan d'expériences dissocient les influences suivantes :

- Influence des paramètres seuls : C'est l'influence isolée des paramètres, sans prendre en compte les interactions qu'ils pourraient avoir avec d'autres paramètres
- Influence des interactions : Ces interactions entre plusieurs paramètres peuvent avoir un effet supplémentaire positif ou négatif.

Sur les analyses graphiques qui suivent, le niveau 1 de chaque paramètre est à gauche, le niveau 2 est à droite.

De manière générale, plus la différence entre ces deux niveaux (différence d'ordonnée) est importante, plus ce paramètre est impactant. Ainsi, dans l'exemple ci-dessous (Figure 7) :

- Le paramètre A est très impactant sur la réponse ;
- Le paramètre B est peu impactant ;
- Le paramètre C est moyennement impactant (avec cette fois-ci, un niveau 2 inférieur au niveau 1).

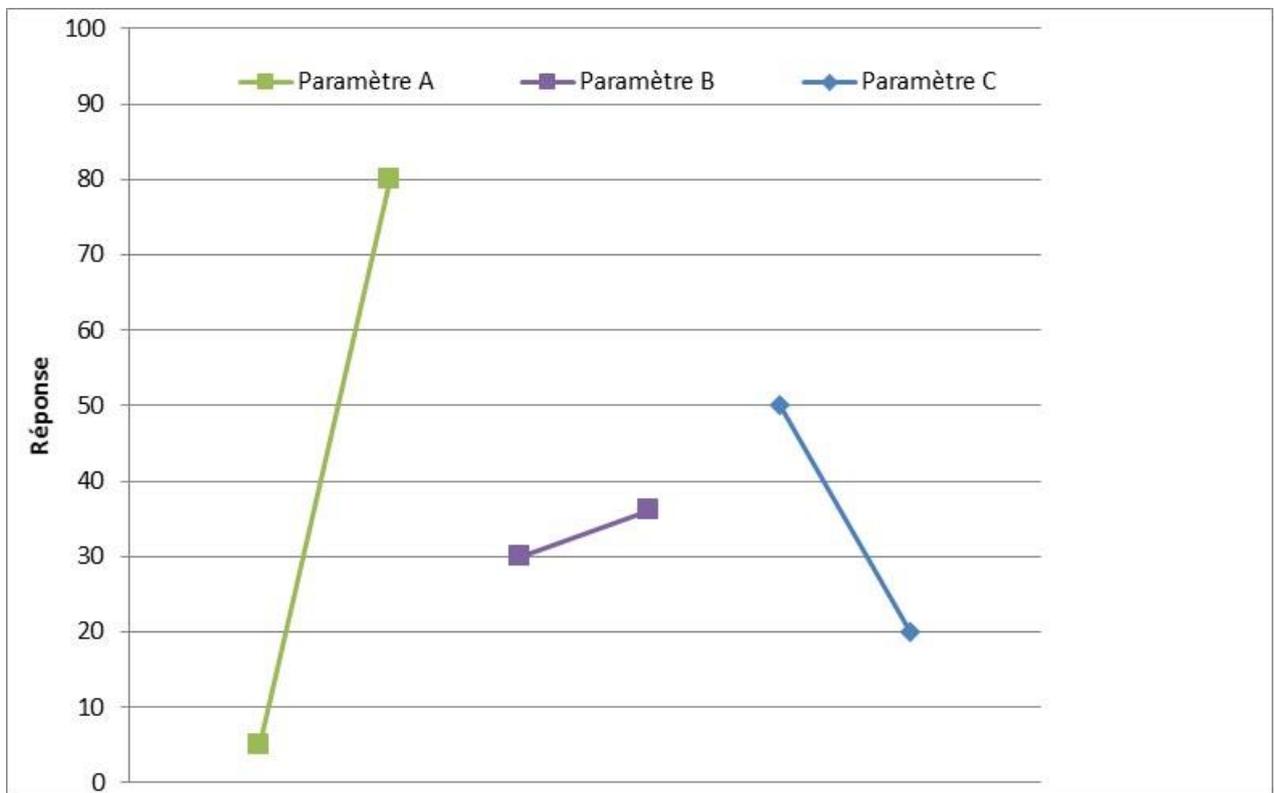


Figure 7 - Exemple d'analyse graphique de plan d'expériences

Réponse TSP

En analysant la seule réponse des TSP, il a été possible de déterminer les facteurs d'influence suivants :

- **Appareil récent :**

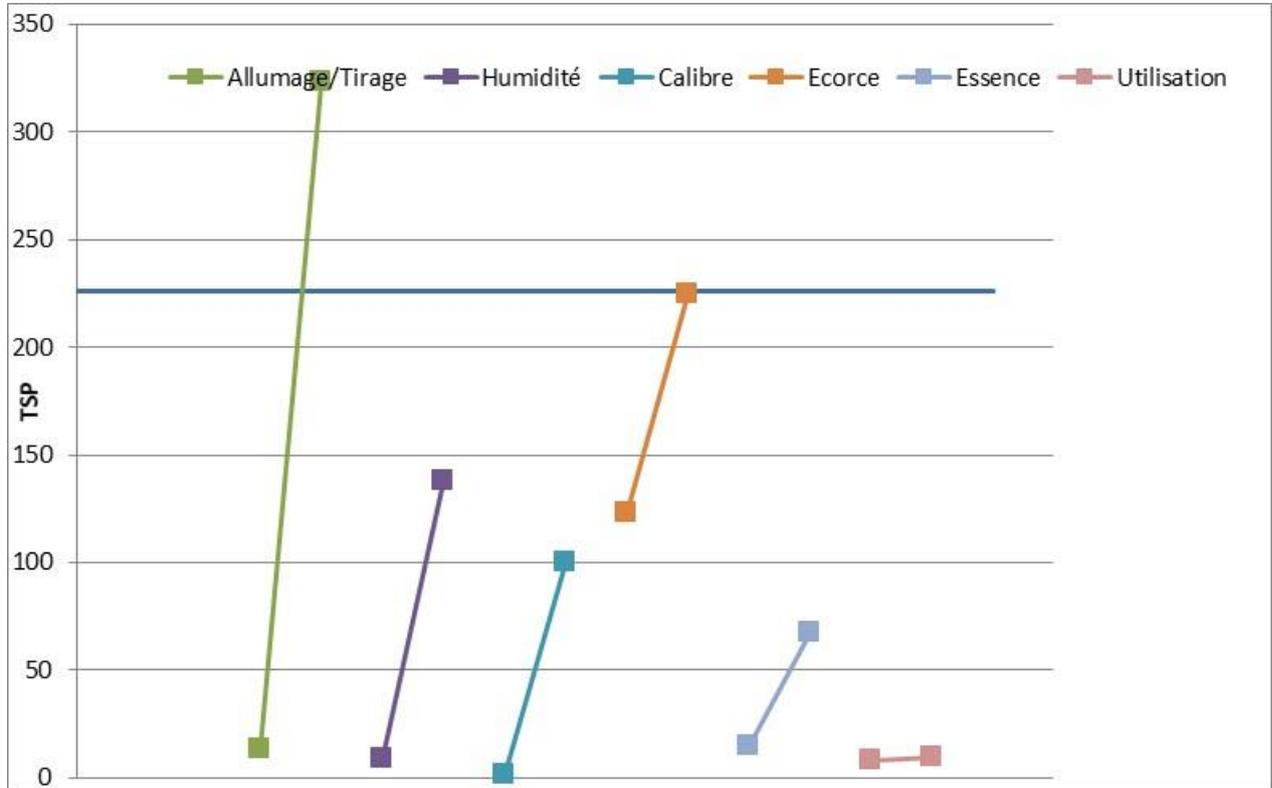


Figure 8 - Influence des paramètres sur l'appareil récent

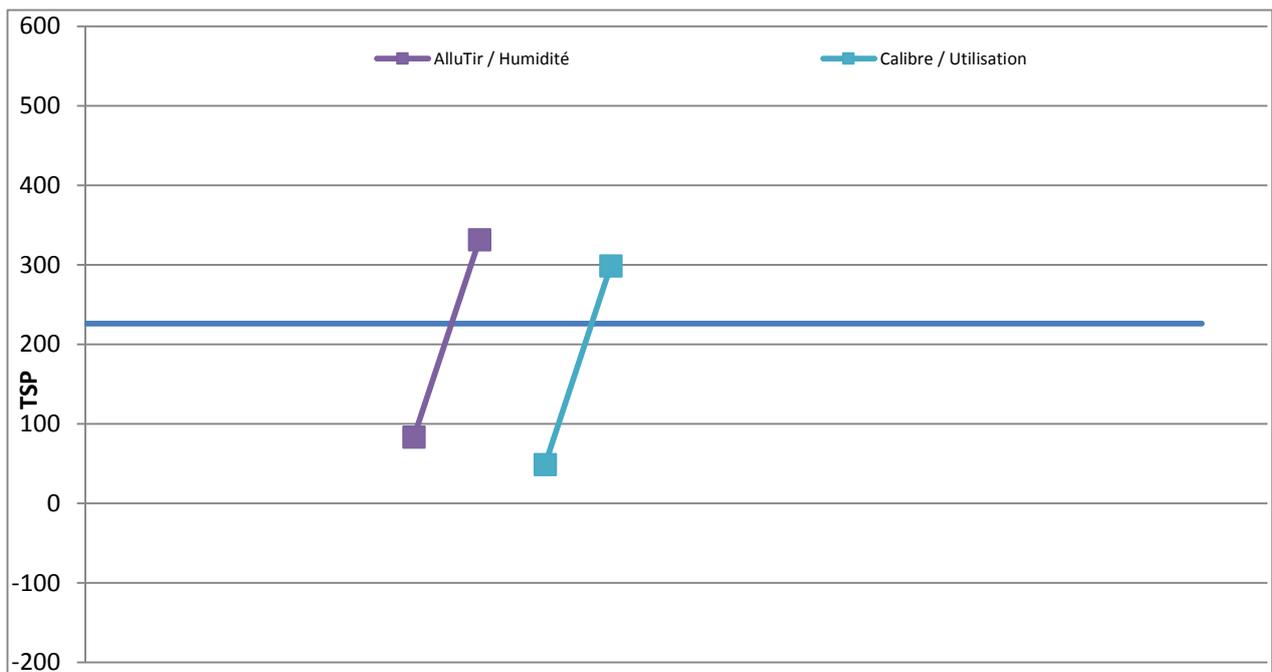


Figure 9 - Influence des interactions sur l'appareil récent

• **Appareil ancien :**

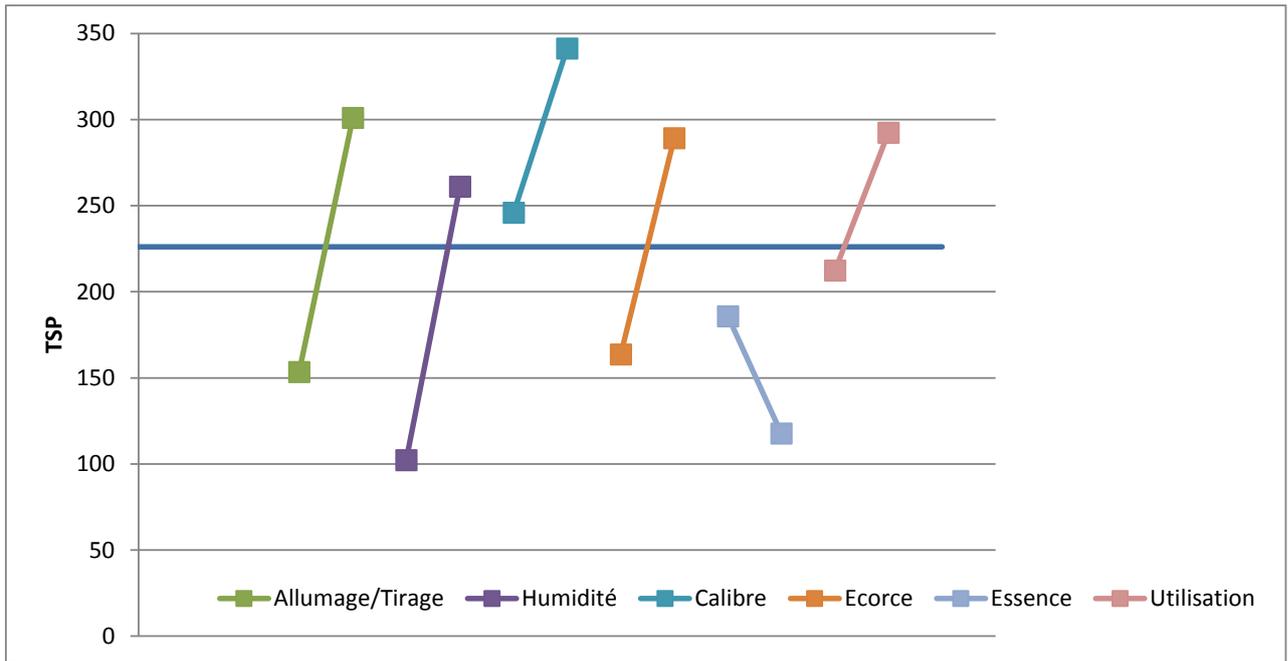


Figure 10 - Influence des paramètres sur l'appareil ancien

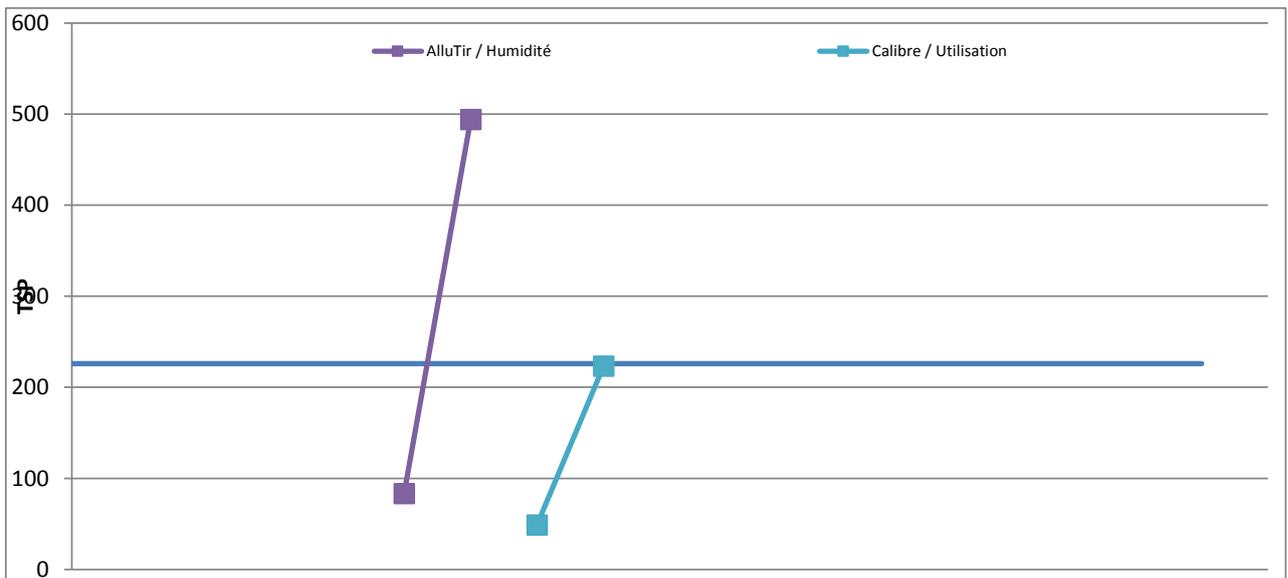


Figure 11 - Influence des interactions sur l'appareil ancien

• **Comparaison des influences entre les deux types d'appareils :**

Dans l'ensemble, en compilant les résultats graphiques des figures 8 et 10, les deux appareils présentent les mêmes tendances en ce qui concerne l'influence des critères (Figure 12), avec des grandeurs d'influence quasi similaires. Le seul critère variant est l'essence. L'appareil ancienne génération émettrait moins de particules avec du résineux, contrairement à l'appareil nouvelle génération.

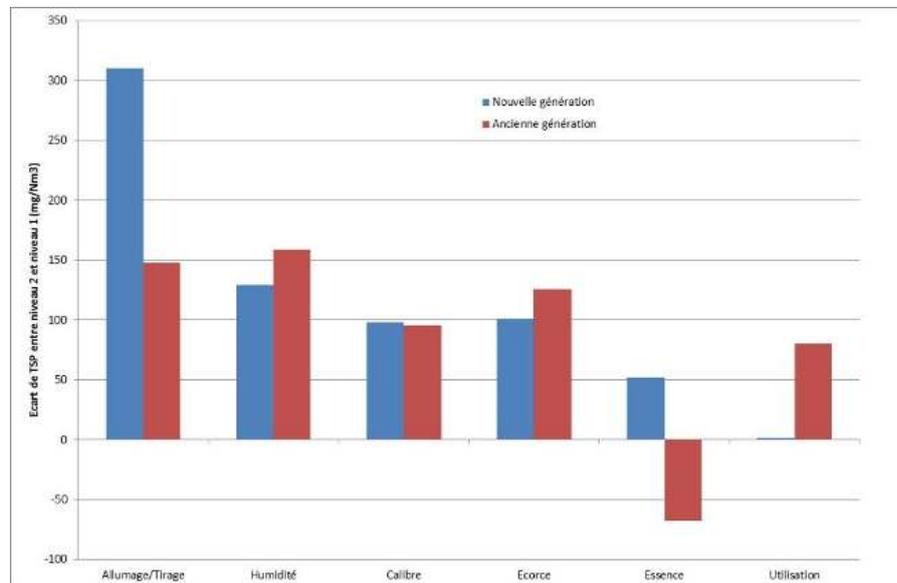


Figure 12 - Ecart de TSP entre niveau 2 et niveau 1 pour l'appareil nouvelle génération et l'appareil ancienne génération

Tableau 13 - Classification des influences

	Appareil récent	Appareil ancienne génération
Influence élevée	1 Allumage/tirage 2 Humidité	1 Humidité 2 Allumage/tirage
Certaine influence	3 Calibre 4 Ecorce	3 Ecorce 4 Calibre
Influence faible/non significative	5 Essence 6 Utilisation	5 Utilisation 6 Essence (en positif)

Les critères humidité, calibre et écorce présentent des influences quasi similaires sur les émissions quel que soit l'appareil. Pour l'allumage/tirage, l'appareil nouvelle génération est beaucoup plus sensible. Pour l'essence, les réactions sont inversées. L'utilisation, quant à elle, impacte majoritairement l'appareil ancienne génération.

Les **interactions** restent les mêmes (voir figures 9 et 11), qu'elles soient basées sur l'appareil nouvelle génération ou ancienne génération.

Globalement,

- La combinaison d'un allumage à froid sans tirage avec du bois humide conduit à une émission supplémentaire (en plus des émissions supplémentaires déjà dues à chacun des critères) entre 200 mg/Nm³ (nouvelle génération) et 500 mg/Nm³ (ancienne génération) ;
- La combinaison d'un calibre niveau 2 et d'une mauvaise utilisation conduit à une émission supplémentaire (en plus des émissions supplémentaires déjà dues à chacun des critères) d'environ 200 mg/Nm³ (nouvelle et ancienne génération) ;

- La combinaison d'un calibre niveau 2 et d'un passage à l'appareil ancienne génération conduit à une émission plus faible (en moins des émissions dues à chacun des critères) d'environ 200 mg/Nm³.

• **Influence des paramètres et des interactions (paramètre appareil inclus) :**

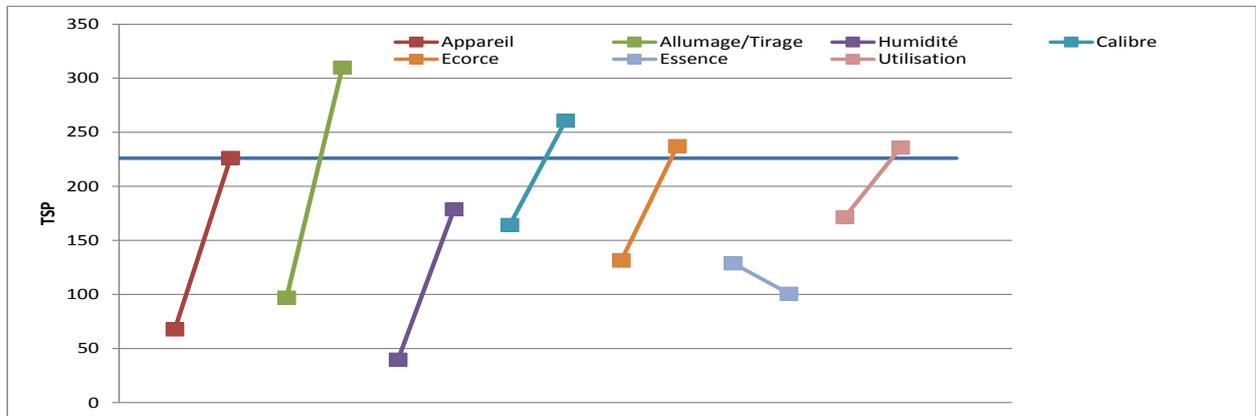


Figure 13 - Influence des paramètres sur les TSP

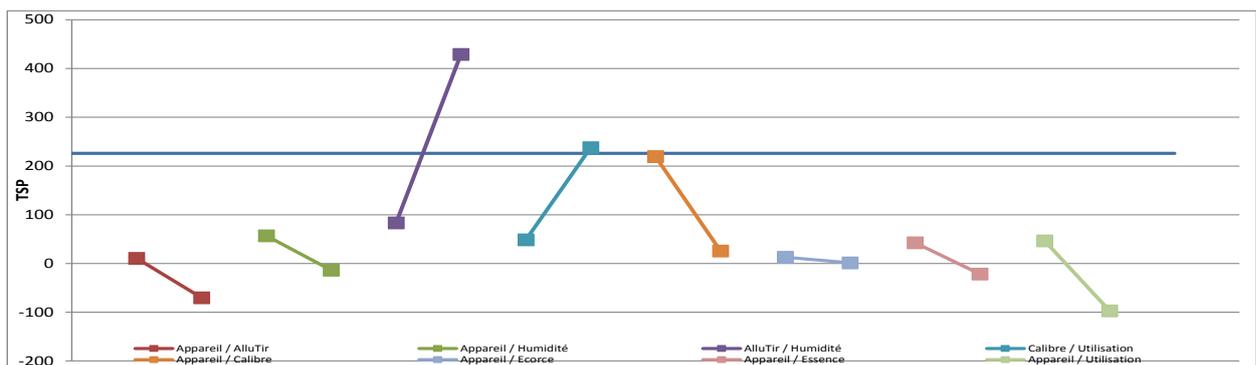


Figure 14 - Influence des interactions sur les TSP

D'une manière générale, l'influence du couple allumage/tirage ou de l'humidité sur les TSP est comparable à celle du type d'appareil (voir figure 12). Certains des paramètres liés au combustible sont donc tout aussi importants sur les émissions de TSP que l'appareil utilisé.

3.4.3. Réponse I'

De manière à prendre en considération le plus d'indicateurs possibles et en complément de l'étude réalisée sur la réponse TSP seule, il a été choisi d'étudier une réponse I' telle qu'elle est définie par l'indice Flamme Verte. Ce choix semble le plus opportun puisqu'il intègre les émissions de particules, les émissions de monoxyde de carbone et le rendement de l'appareil. La réponse étudiée permet ainsi de visualiser les facteurs d'influences sur la « qualité de combustion » plutôt que sur des indicateurs isolés (non pertinents puisque réducteurs). Cette réponse I' est représentative de l'indice de performance environnementale de l'appareil :

$$I' = 101532,2 * \log(1+E') / \mu^2$$

$$E' = (CO + CO_{\text{éqPM}}) / 2$$

$$CO_{\text{éqPM}} = 0,002 * PM$$

CO : Emission en monoxyde de carbone (CO) en % et corrigé à 13% de dioxygène
 PM : Emission de particules totales en mg/Nm3 et corrigé à 13% de dioxygène
 μ : Rendement de l'appareil en %

Figure 15 - Réponse I'

- **Appareil récent :**

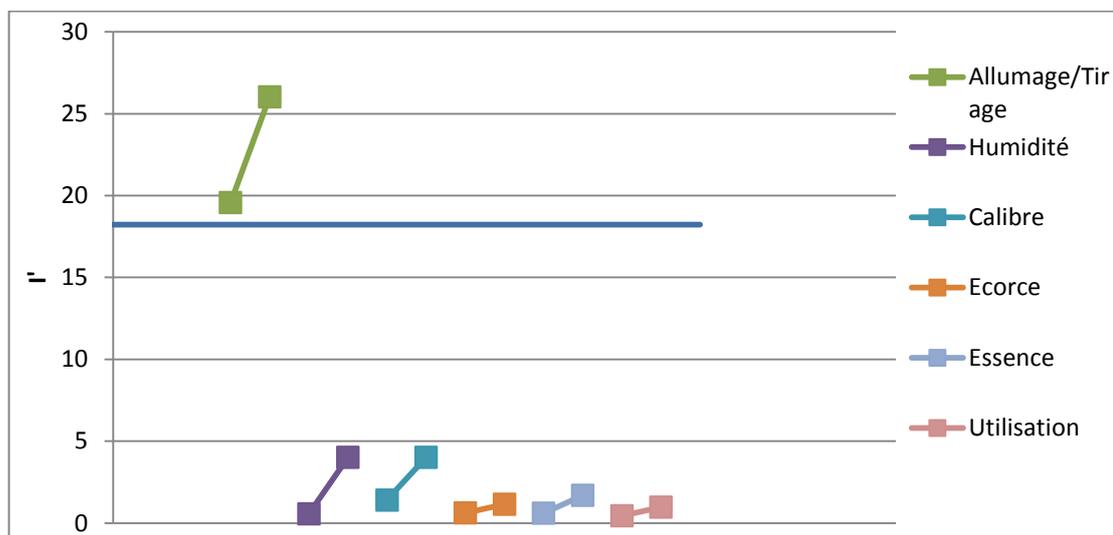


Figure 16 - Influence des paramètres sur l'appareil récent



Figure 17 - Influence des interactions sur l'appareil récent

- **Appareil ancien :**

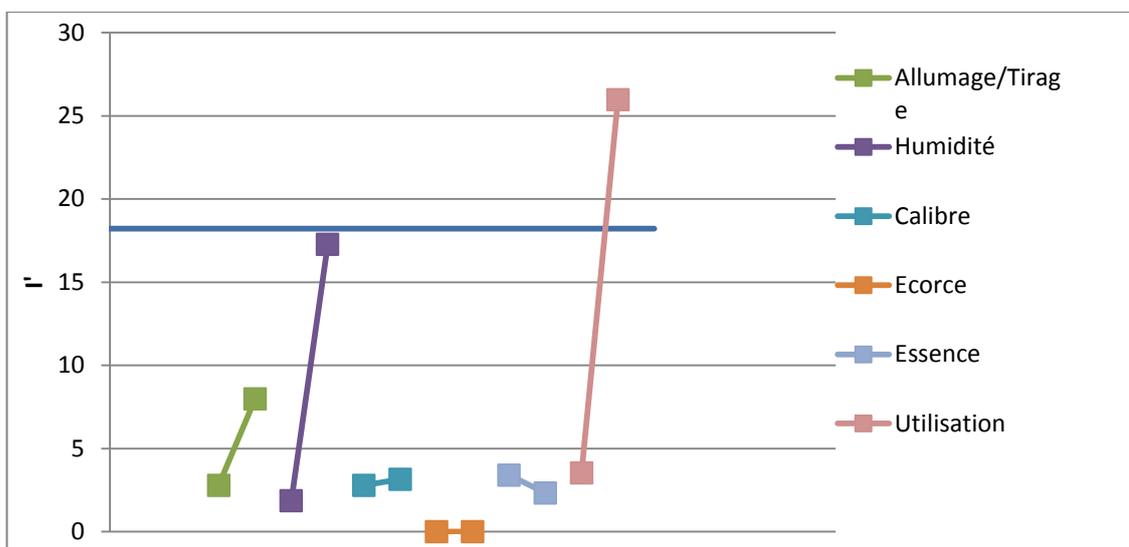


Figure 18 - Influence des paramètres sur l'appareil ancien

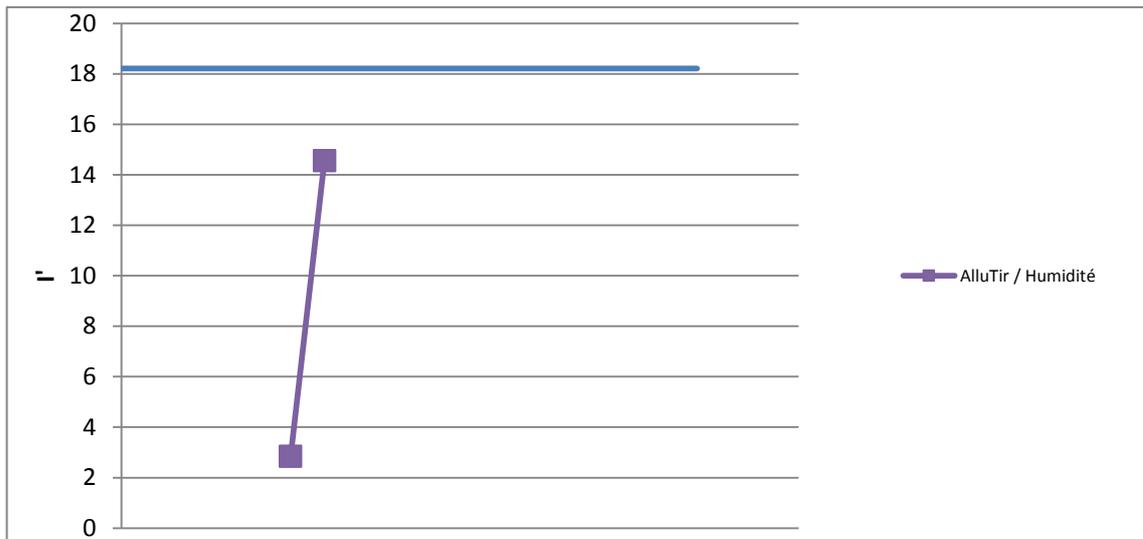


Figure 19 - Influence des interactions sur l'appareil ancien

Les interactions avec le calibre n'ont pas pu être définies à cause d'un essai présentant un rendement très faible, et donc un \bar{y} aberrant.

• **Comparaison des influences entre les deux types d'appareils :**

Globalement, on peut noter que les tendances sont exactement les mêmes que dans le cas d'étude basé sur les TSP. Dans le cas de l'appareil ancienne génération (Figure 16), l'essence aurait un léger effet positif sur la valeur de I'. Autrement dit, l'essence de type résineux augmenterait globalement la teneur en particules, mais émettrait moins de CO.

• **Influence des paramètres et des interactions (paramètre appareil inclus) :**

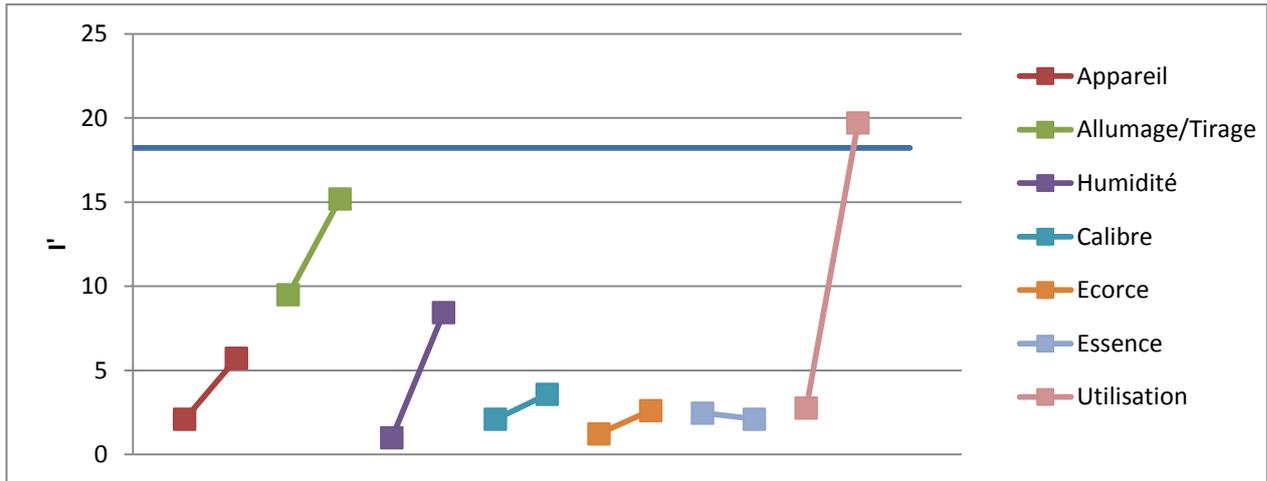


Figure 20 - Influence des paramètres sur l'indice I'

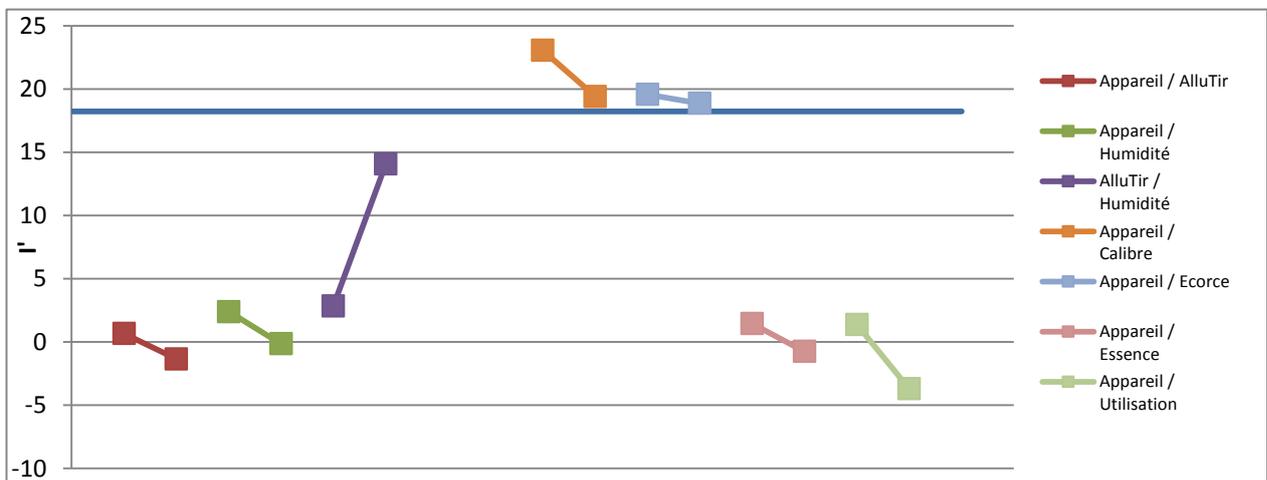


Figure 21 - Influence des interactions sur l'indice I'

Les interactions ont un effet certain uniquement dans trois cas (voir figure 19) :

- 1°) La combinaison d'un allumage à froid et d'une bûche humide augmente drastiquement le I' ;
- 2°) Le passage de l'appareil récent et un calibre de niveau 1 à l'appareil ancienne génération et un calibre de niveau 2 diminuerait le I'. La signification de ce point est clair : l'appareil ancienne génération, bien que globalement plus émetteur de polluants, resterait plus stable dans ses émissions, même lorsqu'un critère passe en niveau dégradé ;
- 3°) Le passage de l'appareil récent et d'une utilisation de niveau 1 à l'appareil ancienne génération et une utilisation de niveau 2 diminuerait le I'. La signification est similaire au point précédent, l'appareil ancienne génération supporterait beaucoup mieux les variations d'arrivée d'air que l'appareil nouvelle génération. Ceci vient en partie du fait que l'appareil récent « étanche » réagit de manière marquée aux réglages d'air utilisés. L'appareil ancien utilise les fuites présentes au niveau de la porte pour apporter de l'air secondaire à la combustion, de façon indépendante des réglages utilisés.

3.5. Essais approfondis – Campagne LERMAB

3.5.1. Composés Organiques Volatils totaux et Méthane

Tableau 14 - Mesures en COV_t et CH₄ corrigées à 13 % d'O₂

Essai	COV _t à 13 % O ₂	CH ₄ à 13 % O ₂
<i>n</i> ^o	<i>ppm eq CH₄</i>	<i>ppm</i>
Exp 29	72	11
Exp 30*	1 605	437
Exp 31	800	126
Exp 32	1 322	230
Exp 33*	123	21
Exp 34*	2 701	1 053
Exp 35	60	11
Exp 36	2 125	554
Exp 37*	2 323	647
Exp 38*	1 960	877

* Expériences pour lesquelles la combustion des bûches fut incomplète (le feu n'ayant pas pris)

3.5.2. Comparaison des différentes méthodes de mesure de particules fines

Impacteur manuel :

Tableau 15 - Mesures de particules fines par impaction manuelle

Essai	PM>10µm (% en masse des PM)	2,5>PM>10µm (% en masse des PM)	1>PM>2,5µm (% en masse des PM)	PM<1µm (% en masse des PM)
<i>n</i> ^o	<i>mg.Nm⁻³ à 13 % d'O₂</i>			
Exp 29	0,2 (5 %)	0,3 (9 %)	0,4 (12,5 %)	2,6 (73,5 %)
Exp 30*	9,9 (21 %)	1,7 (3,5 %)	1,4 (3 %)	31,6 (72,5 %)
Exp 31	0,2 (0,5 %)	0,3 % (1 %)	0,9 (1 %)	83 (97,5 %)
Exp 32	0,1 (0 %)	0,1 (0 %)	2,5 (1 %)	123,8 (99 %)
Exp 33*	0,5 (0 %)	1,8 (0,5 %)	21,1 (4 %)	582,4 (95,5 %)
Exp 34*	0,2 (0 %)	4,6 (0,5 %)	128,4 (10 %)	1112,6 (89,5%)
Exp 35	0,8 (0 %)	2,1 (0,5 %)	18,6 (5,5 %)	247,3 (94 %)
Exp 36	0,4 (2,5 %)	0,7 (4 %)	0,9 (5,5 %)	17,0 (88 %)
Exp 37*	1,3 (3 %)	1,2 (3 %)	1,1 (2,5%)	40,8 (91,5 %)
Exp 38*	3,2 (6 %)	1,7 (5 %)	1,8 (5 %)	47,2 (84 %)

ELPI :

Tableau 16 - Mesures de particules fines par ELPI

Essai	Nombre PM<10 µm	PM _{0,1}	PM _{0,1-1,0}	PM _{1-2,5}	PM _{2,5-10}
<i>n</i> ^o		% en nombre	% en nombre	% en nombre	% en nombre
Exp 29	2,14E+13	87,5	12,5	0,0	0,0
Exp 30*	2,55E+14	67,0	33,0	0,0	0,0
Exp 31	2,80E+13	68,5	31,5	0,0	0,0
Exp 32	7,76E+11	94,5	5,5	0,0	0,0
Exp 33*	3,59E+12	67,0	32,0	1,0	0,0
Exp 34*	3,28E+13	61,0	39,0	0,0	0,0
Exp 35	1,60E+13	76,5	23,5	0,0	0,0
Exp 36	4,88E+14	68,0	32,0	0,0	0,0
Exp 37*	3,49E+13	80,0	20,0	0,0	0,0
Exp 38*	2,96E+14	59,5	40,5	0,0	0,0

En ce qui concerne les mesures ELPI (voir tableau 15), l'ensemble des essais avec des bûches humides présentent en moyenne un ratio de PM_{0,1} plus faible que ceux des bûches sèches. On note également que les proportions sont relativement constantes, aux alentours de 90% de PM_{0,1} pour les bûches sèches, et 68% pour les bûches humides. Seul l'essai 38 contredit cette généralité, mais le feu n'a pas pris pendant cet essai, ce qui explique des résultats plus qu'étonnants.

3.5.3. Analyse des HAP

Tableau 17 - HAP

Nom de l'essai	Naphtalène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Acénaphthylène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Acénaphthène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Fluorène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Phénanthrène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Anthracène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Fluoranthène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Pyrène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)
Essai 29	107 327	14 546	957	3 271	22 746	2 818	10 881	8 684
Essai 30	2 882 100	804 370	57 435	166 382	523 071	96 073	186 789	155 664
Essai 31	275 136	77 478	8 604	47 219	75 270	15 243	17 310	16 099
Essai 32	230 510	63 629	13 225	44 746	64 762	11 771	15 175	14 763
Essai 33	71 832	1 083	1 945	9 145	16 528	2 580	2 860	2 163
Essai 34	59 019	1 391	2 076	9 592	18 175	3 316	3 812	3 527
Essai 35	2 791 290	690 385	78 145	192 932	525 850	97 634	127 141	94 823
Essai 36	815 840	192 473	10 076	40 009	197 655	34 932	50 595	44 620
Essai 37	2 944 428	1 047 896	48 962	237 862	764 474	145 217	272 575	235 188
Essai 38	910 699	357 969	20 728	89 133	267 932	55 304	86 665	80 493

Nom de l'essai	Benzo (a) anthracène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Chrysène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Benzo (b) fluoranthène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Benzo (k) fluoranthène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Benzo (a) pyrène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Dibenzo (a,h) anthracène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Benzo (ghi) pérylène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Indéno (123, cd) pyrène (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)	Somme des HAP (ng/Nm ³ à 13% d'O ₂)
Essai 29	1 310	1 536	617	258	403	60	119	143	175 678
Essai 30	30 246	31 032	20424	8 126	19 487	551	8 561	7 058	4 997 367
Essai 31	2 442	4 422	1411	282	1197	86	765	450	543 413
Essai 32	1 644	2 391	710	149	582	103	262	239	464 661
Essai 33	181	181	181	181	181	181	181	181	109 580
Essai 34	232	232	232	232	232	232	232	232	102 763
Essai 35	14 217	18 687	12 481	3 488	11 844	270	5 139	4 437	4 668 762
Essai 36	8 143	13 428	5 784	1 474	4 703	125	1 971	1 645	1 423 473
Essai 37	43 622	47 566	30 998	12 969	30 641	539	12 496	7 986	5 883 419
Essai 38	14 194	19 329	10 819	4 101	11 430	279	3 963	3 227	1 936 267

3.6 Composition en Carbone Élémentaire et Carbone Organique

Des analyses ont été menées sur la totalité des essais afin de déterminer la composition en carbone élémentaire et carbone organique, composition exprimée en pourcentage sur le carbone total. La valeur en carbone élémentaire est déduite de celle en carbone organique ($EC \% = 100 - OC \%$). Le tableau 17 présente l'ensemble des résultats.

Tableau 18 - Carbone organique

Désignation du filtre	OC % (OC/TC)	Désignation du filtre	OC % (OC/TC)
invi carb 01	73,8	pouj carb 23	58,1
invi carb 02	27,6	pouj carb 24	95,8
invi carb 03	91,3	pouj carb 25	95,8
invi carb 04	52,8	pouj carb 26	93,3
invi carb 05	43,9	pouj carb 27	40,3
invi carb 06	42,8	pouj carb 28	95,5
invi carb 07	45,3	pouj carb 29	85,2
invi carb 08	92,7	pouj carb 30	98,0
invi carb 09	92,4	pouj carb 31	98,0
invi carb 10	71,6	pouj carb 32	96,8
invi carb 11	92,7	pouj carb 33	98,6
invi carb 12	91,0	pouj carb 34	97,1
invi carb 13	77,7	pouj carb 35	92,8
invi carb 14	95,6	pouj carb 36	98,1
invi carb 15	99,5	pouj carb 37	98,5
invi carb 16	37,5	pouj carb 39	93,2
invi carb 17	78,6	pouj carb 40	97,5
invi carb 18	65,9	pouj carb 41	97,2
invi carb 19	57,8	pouj carb 42	96,4
invi carb 20	84,6	pouj carb 8	86,7
invi carb 21	91,9	segin carb 15	73,7
invi carb 22	41,1	seguin carb 01	75,4
invi carb 23	95,9	seguin carb 02	92,9
invi carb 24	97,9	seguin carb 03	72,8
pouj carb 02	85,8	seguin carb 04	76,8
pouj carb 03	61,9	seguin carb 05	89,8
pouj carb 04	96,3	seguin carb 06	86,6
pouj carb 05	85,8	seguin carb 07	93,4
pouj carb 06	42,1	seguin carb 08	95,9
pouj carb 07	88,9	seguin carb 09	82,9
pouj carb 09	80,1	seguin carb 10	89,5
pouj carb 10	87,5	seguin carb 11	95,7
pouj carb 11	80,7	seguin carb 12	97,5
pouj carb 12	95,1	seguin carb 13	94,5
pouj carb 13	97,1	seguin carb 14	25,2
pouj carb 14	97,5	seguin carb 16	96,9
pouj carb 15	97,5	seguin carb 17	66,1
pouj carb 16	95,7	seguin carb 18	30,5
pouj carb 17	87,5	seguin carb 19	73,0
pouj carb 18	92,0	seguin carb 20	88,1
pouj carb 19	91,6	seguin carb 21	96,3
pouj carb 20	91,2	seguin carb 22	97,0
pouj carb 21	85,1	seguin carb 23	96,9
pouj carb 22	95,2	seguin carb 24	96,2

On remarque que la composition en carbone organique est globalement supérieure à 90 % sur l'ensemble des essais. Seuls les essais menés sur l'appareil ancienne génération avec des départs à froid semblent diminuer cette valeur élevée en carbone organique.

4. Recommandations

Au travers de cette étude, il a été montré que, pour améliorer la qualité de l'air, les paramètres liés au combustible sont tout aussi importants que ceux liés à l'appareil. L'utilisation d'un combustible de qualité a aussi l'intérêt d'optimiser l'efficacité énergétique des installations (réduction des consommations) et d'augmenter la durabilité des installations (notamment des conduits de fumée). Enfin, il permet d'agir sur tous les générateurs, que ce soit sur le parc existant ou sur les appareils récents.

Les actions engagées pour améliorer la qualité de l'air doivent donc, pour optimiser leur effet, intégrer la qualité du combustible utilisé. A ce titre, il est primordial de mobiliser l'ensemble des acteurs (industriels, ramoneurs, revendeurs, ADEME, collectivités, particuliers, etc.) autour de ces enjeux, et de cibler en priorité les actions suivantes :

- **Soutenir la filière des ramoneurs, en pleine restructuration**

Dans certains pays comme l'Allemagne, avec l'Ordonnance fédérale sur le contrôle des émissions BImSchV, ou dans certains cantons en Suisse avec l'Ordonnance sur la protection de l'air, des actions ont été mises en place pour que le ramoneur soit en mesure de contrôler la qualité du combustible utilisé. Dans ces localités, ces actions ont été rendues possibles du fait des pouvoirs étendus des ramoneurs par rapport à leurs homologues français. Ils sont par exemple missionnés par les communes pour réaliser les opérations de contrôle et de ramonage obligatoires. Ils interviennent, donc sur avis de passage, pour ces opérations d'après une liste des installations soumises à ces contrôles. Cette action est donc peu transposable en France puisque le rôle du ramoneur dans ces pays est différent de celui des ramoneurs en France, mais ceci renforce l'idée que, dans le cadre de sa restructuration, la filière des ramoneurs doit être soutenue en raison de leur lien privilégié auprès des utilisateurs d'appareils de chauffage au bois domestique.

- **Utiliser des techniques adaptées pour l'obtention d'un combustible de qualité**

Les possibilités techniques pour obtenir un combustible adapté sont multiples et différent en fonction du volume produit. Elles passent par exemple par un séchage naturel (traditionnel) suffisamment long ou un séchage en cellules (industriel).

- Le séchage naturel présente l'avantage d'être peu coûteux en énergie mais reste relativement long (2 ans). La capacité de stockage est donc une contrainte importante pour les revendeurs qui livrent souvent du bois ayant séché moins d'un an sur parc ou sans garantie d'humidité. Dans ce cadre, il est important de veiller aux bonnes pratiques des utilisateurs quant au stockage et au séchage de leur combustible.
- Les techniques de séchage artificiel permettent d'avoir un combustible standardisé plus rapidement (quelques semaines), mais elles sont plus coûteuses et énergivores. On estime que la zone de compétitivité de ces procédés débute à partir de 4000 m³ par an [12].

Pour ce qui concerne le calibre des bûches, les techniques de fendage sont adaptées à la fois à des pratiques artisanales et industrielles. La préconisation de calibres standardisés, qui limiteraient les sections trop importantes, pourrait être une piste intéressante à développer, par exemple dans le cadre de certifications des produits ; mais ceci resterait limité aux seules bûches commercialisées officiellement.

Quant aux moyens de contrôle, pour les revendeurs professionnels, des outils de mesure des caractéristiques des combustibles sont peu coûteux et faciles d'utilisation. Les humidimètres (ex. à pointes résistives) permettent une estimation immédiate de l'humidité d'une bûche (en prenant soin d'effectuer cette mesure à l'endroit approprié).

- **Communiquer les bonnes pratiques auprès des particuliers**

Le développement conjoint des techniques de production de ces bûches et la certification de celles-ci devrait permettre de standardiser les combustibles vendus sur le marché et d'élever leur qualité. Mais il serait important de pouvoir valoriser ces produits auprès des utilisateurs qui ne perçoivent pas toujours l'intérêt de l'utilisation de bois de chauffage adapté à leur installation.

Il pourrait par exemple être créé un label promouvant le bois de qualité (sur le même modèle que Flamme Verte pour les appareils). La certification NF des bûches pourrait aussi s'orienter vers ces produits performants tout en les valorisant auprès des consommateurs.

Le lancement par l'ADEME des Fonds Air, des opérations de renouvellement du parc ancien des appareils de chauffage domestique au bois, menées par les collectivités, doit également permettre de renforcer l'animation territoriale autour des enjeux liés à la qualité du combustible bois.

5. Conclusions et perspectives

Rappel sur la méthode utilisée et sur ses limites :

L'utilisation d'un plan d'expérience est une démarche scientifique ayant pour objectif de déterminer les facteurs d'influences d'un phénomène. Cette démarche rigoureuse présente l'avantage de prendre en compte simultanément 7 paramètres tout en limitant le nombre d'expériences à réaliser.

Cependant, cette méthode a imposé de limiter l'impact de l'opérateur. Les résultats de chaque expérience ne sont donc pas représentatifs de scénarios typiques puisqu'aucune réaction n'a été permise (augmentation de l'air comburant, rechargement sur lit de braise plus important...) malgré des indicateurs visibles de la dégradation de la combustion :

- Appareil bistré et vitre rapidement sale et opaque ;
- Perte, parfois complète de la fonction « chauffage » (extinction).

Ces incidents peuvent se produire, mais dans la pratique leur répétition est peu probable :

- Compte tenu de leur caractère très impactant pour la satisfaction de l'utilisateur : on peut penser qu'en réaction, il adoptera une attitude de recherche de performance efficace ;
- Parce que les instructions d'utilisation indiquent les moyens de les éviter.

Cette démarche est donc avant tout qualitative et en aucun cas quantitative, elle ne permet pas de caractériser des facteurs d'émission en tant que tels.

5.1. Conclusions

D'une manière générale il a été observé que certains paramètres liés au combustible ont tout autant d'impact sur les émissions de TSP ou l'indice Flamme Verte l' que le type d'appareil de chauffage au bois utilisé.

Quel que soit le type d'appareil utilisé, les paramètres impactant la qualité de combustion sont dans l'ordre d'importance :

- Impact fort : le couple allumage/tirage et l'humidité du combustible ;
- Impact moyen : le calibre et la présence d'écorce ;
- Impact faible : Le facteur utilisation et l'essence.

Il est intéressant de noter que malgré des réglages utilisés pour dégrader la combustion (réduction du réglage d'air comburant), le facteur utilisation reste peu impactant au regard des autres paramètres.

Par ailleurs, l'analyse des interactions a montré que lors de la dégradation simultanée de deux paramètres liés au combustible et à la combustion, il pouvait y avoir un effet supplémentaire négatif sur les émissions de polluants par rapport aux influences isolées des deux paramètres. Ces résultats ont été observés en particulier pour les interactions suivantes : allumage&tirage/humidité, appareil/calibre et appareil/utilisation.

5.2. Perspectives

Concernant l'amélioration de la qualité de combustion, et donc, de la qualité de l'air, des pistes de progrès concrètes apparaissent donc au regard des résultats obtenus. Ces progrès pourraient d'ailleurs être complémentaires aux améliorations techniques qu'apportent déjà les fabricants d'appareils de chauffage au bois.

- Allumage/tirage : Un dimensionnement adapté de la fumisterie couplé à des méthodes d'allumage plus performantes améliorent la qualité des émissions de TSP. Certaines méthodes (allumage par le dessus – méthode suisse) sont réputées comme efficaces et moins polluantes.

En ce qui concerne les combustibles, des solutions techniques existent pour obtenir des bûches adaptées :

- Secs : Le séchage naturel (traditionnel) ou industrialisé (en cellules) permet d'atteindre des humidités inférieures à 20 %. Pour les revendeurs professionnels, des humidimètres à pointes permettent de contrôler facilement et à bas coût le niveau d'humidité du combustible (l'aspect visuel des bûches est insuffisant pour jauger de leur humidité).
- Calibrés : Les fabricants d'appareils de chauffage au bois ont généralement des préconisations claires à ce sujet (masse, longueur et nombre de bûches). Les bûches fendues sont courantes sur le marché, même si leur calibre reste souvent élevé. Attention cependant :
 - Les utilisateurs ont parfois l'habitude d'insérer des charges supérieures (masse et calibre) à celles préconisées ;
 - Pour respecter les charges préconisées pour les appareils de petite puissance (6 kW), le calibre des bûches est généralement de moins de 10 cm de diamètre. Les bûches traditionnellement proposées par les vendeurs (de calibre plus élevé) devraient être refendues.
- Sans écorce : Les bûches écorcées ne sont pas courantes sur le marché du bois de chauffage. Seuls des process industrialisés permettent d'enlever la majeure partie de l'écorce des bûches. Cependant, les bûches sèches (suivant leur essence) ont tendance à perdre plus facilement leur écorce. L'achat de bois sec devrait donc réduire en partie leur quantité.

Références bibliographiques

- [1] : Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France : séries sectorielles et rapport étendu, CITEPA, format SECTEN, 336 p, avril 2012
- [2] : Rapport COMOP ENR n°10 du Grenelle Environnement
- [3] : Health effects of Black Carbon, World Health Organization, Regional Office for Europe, ISBN 978 92 890 0265 3, 96 p, 2012
- [4] : User and fuel impacts on the emission of a chimney stove, C.Schön, H.Hartmann, P.Turowski; TFZ, 2011
- [5] : Integration of biomass drying with combustion/gasification technologies and minimization of emissions of organic compounds ; Svoboda, K, Martinec, J, Pohorely, M, Baxter, D ; CHEMICAL PAPERS Volume 63 p 15-25, 2009
- [6] : Slagging characteristics during residential combustion of biomass pellets ; Gilbe, C, Ohman, M, Lindstrom, E, Bostrom, D, Backman, R, Samuelsson, R, Burvall, J ; ENERGY & FUELS Volume: 22 p 3536-3543, 2008
- [7] : Etude ADEME –LERMAB, ENSTIB, UHA, SUPRA, Amélioration des performances environnementales et de l'intégration dans l'habitat des équipements de chauffage domestique au bois, 2008
- [8] : Rogaume, C., Rogaume, Y., Trouvé, G., Zoulalian, A. Environmental assessment of wood burning in independent heating devices. Pollution Atmosphérique, Numéro Spécial, Le bois énergie : enjeux écologiques et de santé environnementale, 135-154, march 2009.
- [9] : NF X43-329 : Émissions de sources fixes - Prélèvement et mesurage d'hydrocarbures aromatiques polycycliques à l'émission, mai 2003
- [10] : BVA, «Le chauffage au bois : marchés et approvisionnements,» 2013.
- [11] : S. F. Agency, Swedish Statistical Yearbook of Forestry.
- [12] : Le séchage du bois de chauffage - Synthèse ; G. Négrier ; CTBA, 2005

Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
CEN	Comité Européen de Normalisation
CERIC	Centre d'Essais et de Recherche des Industries de la Chimie
CITEPA	Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique
COV	Composés Organiques Volatiles
COVnM	Composés Organiques Volatiles non Méthaniques
COVT	Composés Organiques Volatiles Totaux
CTBA	Centre Technique du Bois et de l'Ammeublement
D2I	Dupire Invicta Industrie
EC	Carbone Élémentaire
ELPI	Electrical Low Pressure Impactor
FID	Détecteur à Ionisation de Flamme
FV 5*	Flamme Verte 5 étoiles
HAP	Hydrocarbure Aromatique Polycyclique
LERMAB	Laboratoire d'Étude et de Recherche sur le Matériau Bois
NF 444	Référentiel de certification NF Biocombustibles Solides
NOx	Oxydes d'Azote
OC	Carbone Organique
PCIh	Pouvoir Calorifique Inférieur sur base humide
PCIs	Pouvoir Calorifique Inférieur sur base sèche
PCS	Pouvoir Calorifique Supérieur
PM (X)	Matières Particulaires (de diamètre inférieur à X micromètres)
PNSE2	Plan National Santé Environnement n°2
SECTEN	SECTeurs Economiques et éNergie
TSP	Total Suspended Particles

Annexes

- Annexe 1 : Recensement des qualités de combustibles bois de chauffage présentes sur le marché
- Annexe 2 : Caractérisation des combustibles, projet QUALICOMB
- Annexe 3 : 1733 : Qualicomb Essais SEGUIN DUTERIEZ (campagne1)
- Annexe 4 : 1750 : Qualicomb Essais INVICTA (campagne2)
- Annexe 5 : 1845 : Qualicomb Essais Poêle WABI (campagne3 - CERIC)
- Annexe 6 : 1846 : Qualicomb Essais Insert SUNFLAM (campagne3 - CERIC)

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) 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.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



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

www.ademe.fr

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Higher Education and Research. 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

Rapport d'Etude Technique

Recensement des qualités de combustibles bois de chauffage présentes sur le marché



LABORATOIRE CERIC
CS 50016

79270 SAINT-SYMPHORIEN

TÉL. 05 49 09 53 92

FAX 05 49 09 50 05

info@laboratoire-ceric.com

www.laboratoire-ceric.com



VERSION DE DOCUMENT

Rév.	Par	Le	Action
A	LANDREAU Julien	17/03/2016	Rédaction
	DRUETTE Lionel	28/10/2015	Validation
			Rédaction
			Validation
			Rédaction
			Validation

DESTINATAIRES

Nom	Fonction	Société
DE GALEMBERT Aymeric	Relecteur	SEGUIN DUTERIEZ
POSTEL Serge	Relecteur	D2I
PROHARAM Florence	Destinataire	ADEME
ROGAUME Caroline	Co-Rédacteur	LERMAB

REFERENCEMENT CERIC

Type de rapport	Rapport de synthèse	
Référence dossier	D534 Projet ADEME QUALICOMB	
Catégorie	Bois combustible	
Thème	Etude	
Sous-Thème	/	

Rapport d'Etude Technique

Créé le 20/01/2015

M. à J. le 20/01/2015

AVANT-PROPOS

Le développement des énergies renouvelables a été largement encouragé afin de participer à l'atteinte des objectifs assignés par le protocole de Kyoto. Parmi ces énergies, la biomasse occupe une large part, surtout dans le secteur du chauffage domestique. Cependant, même si le bilan carbone est faible pour ces combustibles, d'autres composés polluants peuvent être rejetés lors de leur combustion et peuvent ainsi présenter des dangers connus pour l'environnement et la santé.

Or, aujourd'hui 85 % du bois énergie est utilisé dans les appareils domestiques indépendants. Si la réglementation relative aux rendements et contrôles périodiques des chaudières de fortes puissances est bien suivie, le réel défi aujourd'hui reste les installations domestiques de petites puissances.

La mise en place de labels attestant des bonnes performances des appareils (label « flamme verte »), est une première étape mais doit être complétée pour réduire les émissions atmosphériques dues à la combustion domestique du bois tout en améliorant les rendements énergétiques.

En effet, la qualité du combustible utilisé par les particuliers est très différente de celle utilisée par les industriels et les laboratoires lors de la qualification de performances des appareils. Or, ces performances sont garanties avec le combustible normalisé, sans quoi le rendement des appareils de chauffage peut chuter (de l'ordre de 10 points de rendement perdus) et les émissions dans l'air peuvent augmenter. Ce qui présente un impact important à la fois sur les performances du chauffage, les émissions de polluants, mais aussi sur la consommation des ressources (consommation de bois supplémentaire pour atteindre un confort similaire).

Le projet ADEME QUALICOMB a pour objectif d'évaluer l'impact de la qualité du combustible bois bûches sur la combustion. Ce premier rapport fait état des ressources utilisées comme bois de chauffage en France ainsi que des caractéristiques de ces différents combustibles. Il permet au final de définir les niveaux des paramètres qui seront ultérieurement retenus pour réaliser les expériences du projet.

Rapport d'Etude Technique

Table des matières

1	Introduction	7
2	La ressource :	8
2.1	Une forêt en croissance	8
2.2	Une forêt aux essences variées	8
2.3	Une forêt fragmentée	9
2.4	Une forêt sous exploitée	9
2.5	Le Bois Energie, une solution d'avenir	10
3	Le marché des appareils de chauffage au bois.....	10
3.1	Les appareils de chauffage au bois.....	10
3.2	Les pratiques des utilisateurs :	11
4	Le bois bûches.....	12
4.1	Les caractéristiques techniques des produits certifiés.....	12
4.1	Les produits disponibles sur le marché	13
5	Conclusion:.....	14
6	Bibliographie	15

Rapport d'Etude Technique

1 Introduction

La forêt française, l'une des plus grandes d'Europe, a la particularité et l'avantage d'être riche de diversité. Les essences qui la composent permettent des utilisations du bois comme bois d'œuvre, d'industrie ou pour l'énergie. C'est d'ailleurs cette dernière activité qui représente la majorité de la récolte, principalement pour le chauffage domestique.

Depuis une dizaine d'année, le marché des appareils de chauffage au bois domestiques évolue. Les utilisateurs privilégient aujourd'hui des poêles alors qu'ils achetaient majoritairement des inserts en 2006. Cette tendance est confortée par les nouvelles réglementations thermiques qui diminuent les besoins en chauffage des bâtiments. Ces nouveaux appareils, performants, imposent l'utilisation de bûches souvent plus petites et calibrées.

Cependant, la certification des bûches reste minoritaire. Leurs caractéristiques sont souvent liées à la disponibilité du produit (ressources locales et saisonnalité). Les producteurs s'adaptent aux contraintes du marché (dimensions des bûches), mais ne garantissent pas toujours les taux d'humidité recommandés par les fabricants d'appareils.

2 La ressource :

2.1 Une forêt en croissance

La forêt française couvre aujourd'hui 16,4 millions d'hectares, soit 30 % de la surface métropolitaine. Elle se situe à la quatrième place des plus grandes forêts d'Europe après la Suède (27 millions d'hectares), la Finlande (22 millions d'hectares) et l'Espagne (18 millions d'hectares).

Cette surface est en croissance constante depuis 1980 (+0,6% entre 1980 et 2010). L'augmentation la plus forte se situe dans le sud-est (Languedoc-Roussillon, Corse et Alpes-du-Sud) et dans le nord-ouest (Bretagne et Pays-de-la Loire).

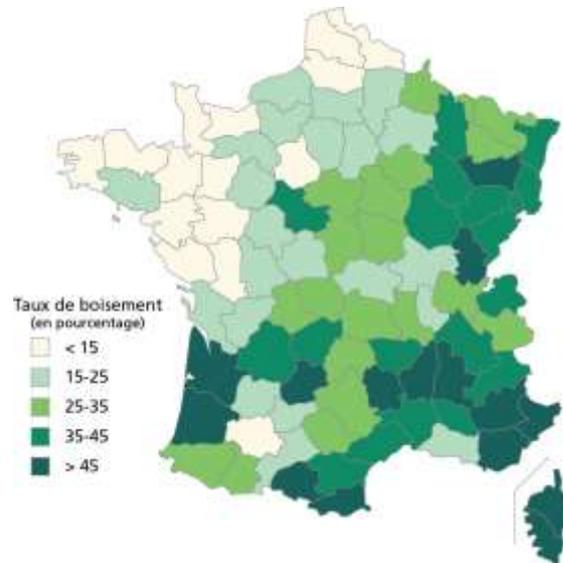


Figure 1 Taux de boisement par département
Inventaire forestier – Le memento – édition 2013 - IGN

2.2 Une forêt aux essences variées

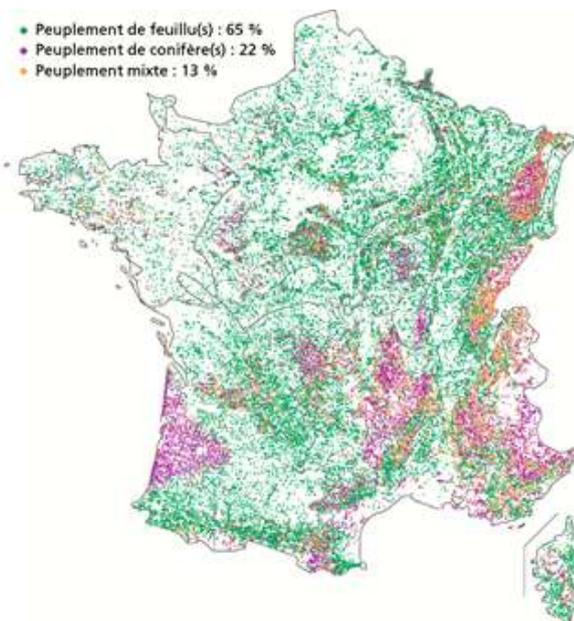


Figure 2 Répartition des essences –
Inventaire forestier – Le memento – édition 2013 - IGN

La forêt française est composée de 136 espèces d'arbres dont les différentes caractéristiques permettent aujourd'hui des usages variés.

Majoritairement, cette forêt est peuplée de feuillus, mais certaines zones géographiques comme le massif landais sont constitués d'un peuplement monospécifique de résineux.

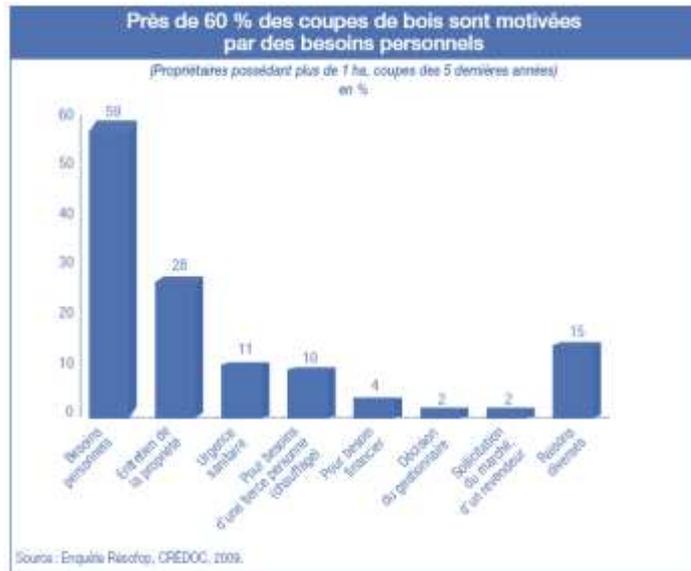


Rapport d'Etude Technique

2.3 Une forêt fragmentée

Les trois-quarts de la forêt française métropolitaine (12,4 millions d'hectares) appartiennent à des propriétaires privés (3,5 millions de propriétés forestières privées dont **1,4 millions de plus de 1 ha**) [1]. **La forêt publique ne représente donc qu'un quart des forêts métropolitaines.**

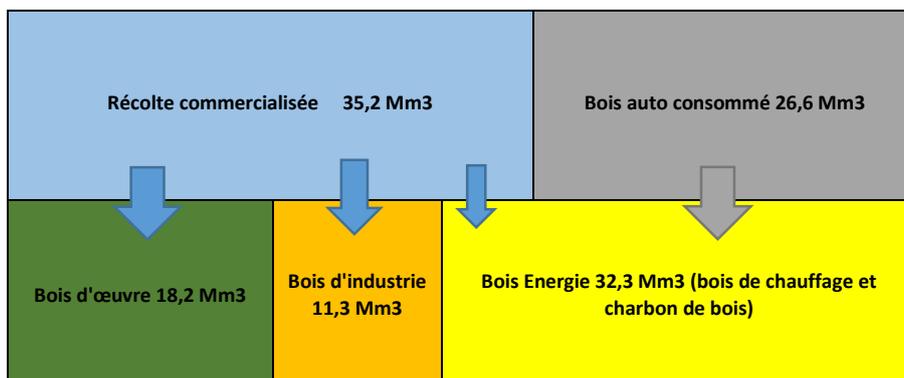
Ce morcellement de la propriété forestière réduit les possibilités d'exploitation des forêts privées. Ce n'est qu'au-delà de 150 ha que plus de 50% des propriétaires disent rechercher un produit financier et se considèrent comme producteur de bois. En deçà, les propriétés forestières sont des éléments constitutifs du patrimoine sans objectif économique. Seule la moitié des propriétaires de plus de 1 hectare exploitent leur potentiel.



L'exploitation de ces ressources privées est ensuite destinée à la filière professionnelle à hauteur de 78%, à la vente directe à hauteur de 4% (majoritairement du bois bûches) et à l'autoconsommation à hauteur de 18% (majoritairement du bois bûches).

2.4 Une forêt sous exploitée

En France, la récolte de bois est inférieure à l'accroissement naturel des forêts. En 2012, la récolte forestière était évaluée à près de 61,8 millions de m³/an (dont 26,6 Mm³ auto consommés) [2] alors que sa croissance représentait près de 86 millions de m³/an [3]. Le potentiel de ressource bois disponible semble donc en France sous-exploité. Ce fort potentiel est cependant à nuancer, puisque les ressources disponibles ne sont pas toutes techniquement mobilisables, sans compter que les propriétaires ne sont pas tous disposés à vendre leur bois.



2.5 Le Bois Energie, une solution d'avenir

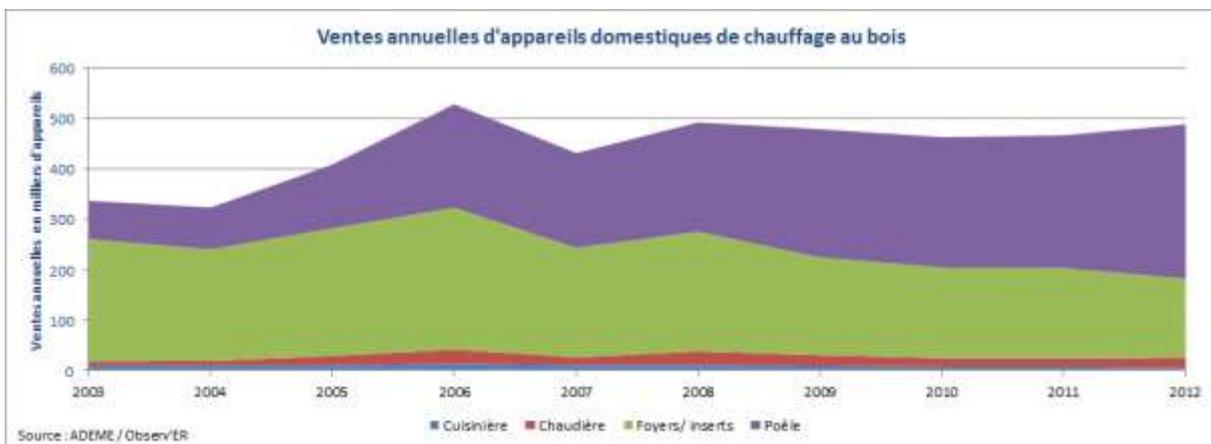
Avec une consommation primaire comprise entre 9 et 10 millions de tonnes équivalents pétrole (Mtep) ces 5 dernières années [4], la France se situe à la première place des pays européens consommateurs de bois pour l'énergie.

Sur cette même période, on estime entre 6,13 et 7,56 Mtep [4] la part de cette consommation imputée au secteur domestique. **Entre 42 et 51 millions de stères¹ de bois sont donc consommés chaque année pour le chauffage domestique.**

3 Le marché des appareils de chauffage au bois

3.1 Les appareils de chauffage au bois

On estime que 7 millions de foyers sont aujourd'hui équipés d'un appareil de chauffage au bois. En 2012, près de 490 milliers d'appareils ont été achetés en France.



	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Cuisinière	10,6	10,5	10,7	13,7	11,3	11,2	9,9	7,7	7,4	6,615
Chaudière	8,1	8,8	18,5	28,4	15	27,1	20,9	17,3	17	19,36
Poêle	76,1	83	127,1	205,5	188,4	217	254,7	258,8	263,3	306,65
Foyers/ inserts	242,7	221,8	253,4	281,6	217,5	237,8	194,2	180	179,8	156,6
Total	337,5	324,1	409,7	529,1	432,3	493,1	479,6	463,8	467,4	489,225

¹ Avec 0,147 tep par stère

Rapport d'Etude Technique

Les attentes des consommateurs ont aussi évolué. Alors que les achats concernaient principalement des foyers et inserts jusqu'en 2008, ce sont les poêles qui sont majoritairement installés. La croissance de ce secteur d'appareil est notamment portée par le développement des poêles contemporains (taux de croissance annuel moyen de 19%) et des poêles à granulés [5]. Ces appareils sont globalement plus performants et de puissance inférieure aux foyers et inserts de génération antérieure.

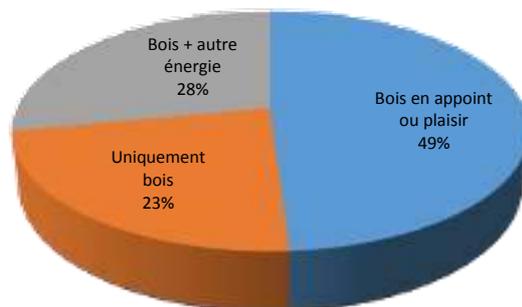


3.2 Les pratiques des utilisateurs :

D'après l'enquête BVA Le chauffage au bois : marchés et approvisionnements [6], 7 361 280 ménages utilisent le bois comme moyen de chauffage. Sur ce nombre, la grande majorité (92%) se chauffe avec du bois bûche. Avec une moyenne de 7,54 stères par an et par foyer, ce sont donc 51 250 088 stères de bois qui sont donc consommés par an.

Sur les utilisateurs de chauffage au bois, 51% utilisent le bois comme chauffage principal.

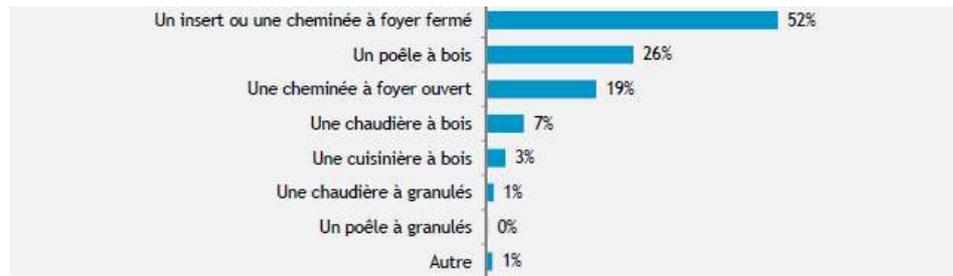
Utilisateurs du chauffage au bois



Rapport d'Etude Technique

Malgré la conversion récente des achats vers les poêles au détriment des inserts, ce sont majoritairement ces derniers qui sont utilisés sur le parc existant. De plus, 19% des utilisateurs de bûches utilisent toujours leur foyer ouvert.

Appareils de chauffage utilisés



Etude BVA / Zoom sur les utilisateurs de bûches

Au final, les appareils utilisés sont pour moitié relativement anciens ou peu performants (installés avant 2000 ou foyers ouverts). Ces appareils ont l'inconvénient d'avoir un rendement plus faible, ainsi que des émissions de poussière plus élevées que les appareils performants actuels.

4 Le bois bûches

En France, la filière commerciale du bois bûche est surtout organisée de manière locale. De nombreux producteurs commercialisent leur combustible directement au consommateur. Le bois bûches est dans sa majorité commercialisé sans certification, donc sans garantie de ses caractéristiques (humidité, quantité).

4.1 Les caractéristiques techniques des produits certifiés

Aujourd'hui, seulement six producteurs de bûches sont certifiés NF Biocombustibles solides. La production de bois bûches certifié est donc minime au regard de la consommation.

Les principales caractéristiques garanties par cette certification sont :

- Les essences :

G1 : chêne, charme, hêtre, frêne, érable

G2 : châtaignier, robinier faux acacia, merisier, fruitiers divers, bouleau

LISTE DES PRODUCTEURS BENEFICIAIRE DE LA MARQUE DE QUALITE NF BIOCOMBUSTIBLES SOLIDES BOIS DE CHAUFFAGE							
N° UTILISATEUR	NOM SOCIETE	ADRESSE	CODE POSTAL	VILLE	Groupe d'habitat	Classe # Standard	Type de conditionnement
27	ASSOCIATION LE CLEROUIN (EST LA COLAINE)	24 ROUTE CARREUSE	47100	MARQUEVILLE	G1	H1	Poêle
9	LEBELLY PRODUITS SALES	881 AVE	10000	SAVIGNY	G1	H1 FD	Poêle
26	EURONERGES	PARC INDUSTRIEL ECONOMIQUE	70000	GRANDY GRIFT	G1	H1	Poêle Sac V40
1	FORESTIERE DU NORD	CHEMIN PROTOIS	61430	ENF	G1	H1	Poê
17	LA SANNEVILLE	21 RUE DE GAUILLÉ	80000	SANNEVILLE	G1/G2	H1 FD	Poêle Vitr
8	CAUDRY SA	23 LE MARAIS	80040	LE VAL D'AULX	G1	H1 FD	Poêle Vitr

Rapport d'Etude Technique

Créé le 20/01/2015

M. à J. le 20/01/2015

- L'humidité :

H1 : < 20% (pour le bois prêt à consommer)

H2 : > 20% (pour le bois à faire sécher)

- Les quantités

- Les longueurs

A l'heure actuelle, aucune notion de calibre ou de quantité d'écorces n'est abordée par ce référentiel.

4.1 Les produits disponibles sur le marché

Les revendeurs communiquent principalement sur des notions de volumes, d'essences et de coût. La notion d'humidité est aussi abordée mais secondairement.

Les utilisateurs semblent pourtant sensibles à l'humidité du combustible qui leur est livré. L'humidité est le troisième critère de choix cité par les consommateurs après l'essence et le prix [6]. Cependant, ces mêmes consommateurs disent utiliser du bois ayant séché moins de deux ans à hauteur de 54 % (21% moins d'un an) alors qu'ils considèrent à 96% utiliser du bois sec. Il y a donc un écart entre l'idée de la qualité du combustible que se fait le consommateur et ses réelles performances.

L'humidité :

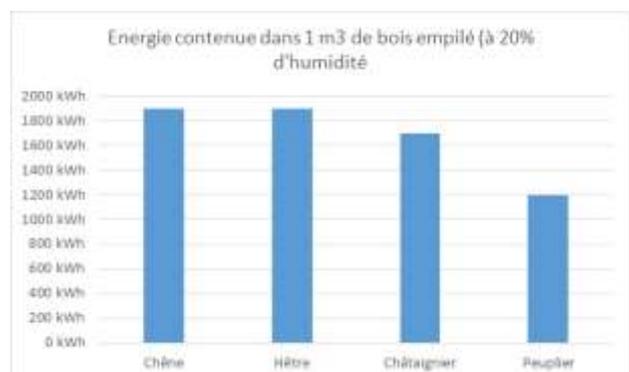
Etant données les problématiques de stockage, de nombreux revendeurs livrent du bois ayant séché moins d'un an sur parc ou sans garantie d'humidité. Ceci est d'autant plus vrai que l'on avance dans la saison de chauffage, les produits secs faisant place à des coupes récentes.

Cependant, certains process industrialisés permettent aujourd'hui de proposer des bûches calibrées, séchées en étuve tout au long de la saison. Ces produits ont l'avantage de garantir des taux d'humidité et des caractéristiques de bûches maîtrisées.

L'essence :

Les principales essences commercialisées pour le bois de chauffage sont les suivantes : chêne, charme, hêtre. Ces essences de feuillu dur sont privilégiées par les consommateurs en France. C'est d'ailleurs leur premier critère de choix. La combustion de ces bûches dure plus longtemps que pour du résineux, leur densité énergétique est plus importante (1 m³ de feuillu dur contient donc plus d'énergie que le même volume de résineux ou de feuillu tendre).

Des essences tendres (peuplier, pin) sont aussi parfois commercialisées. Elles sont peu utilisées comme bois de chauffage en France, mais certains pays comme la



Suède, dont le parc est composé de 85% de résineux [7] (pin et épicéa) utilisent fréquemment le bois résineux comme source de bois de chauffage.

La longueur :

Aujourd'hui, la majorité du bois de chauffage est commercialisé en longueur 1 m ou 0,5 m. Cependant, pour accompagner l'évolution du marché vers des poêles, les producteurs proposent désormais des longueurs 0,4 m, 0,3 m ou même 0,25m.

La section :

La plupart des revendeurs proposent du bois fendu. Il est cependant à noter que les utilisateurs préfèrent souvent acheter du bois fendu en gros quartier, qui leur semble plus qualitatif, alors que les poêles actuels préconisent des charges proches de 1,5 kg en deux quartiers (section de diamètre 8-10 cm).

5 Conclusion:

Ces différentes observations nous montrent qu'il est important de mesurer de façon précise l'impact qu'ont les combustibles sur les performances des appareils de conception ancienne ou récente en étudiant les critères suivants :

- L'essence : Les pays nordiques utilisent principalement des résineux au contraire de notre marché qui privilégie les feuillus. Il semble donc intéressant de comparer les deux groupes d'essences dans cette étude.
- L'humidité : L'humidité des bûches utilisées par les consommateurs semble en partie supérieure à celle préconisée par les fabricants. Deux niveaux d'humidité seront retenus pour les expériences.
- Le calibre : Les fabricants d'appareils préconisent des charges précises (en masse et en nombre de quartiers). Cependant, dans la pratique, un gros quartier est souvent privilégié à une charge fendue. Ces deux pratiques seront donc évaluées.
- La quantité d'écorces : Certains producteurs de bois de chauffage proposent des bûches « sans écorce ». L'objectif serait donc d'en mesurer l'intérêt.

Les paramètres étudiés et les niveaux retenus sont donc les suivants :

Niveau	Humidité	Essence	Calibre	Ecorce
1	<20% (bois sec)	Feuille dur (préférences utilisateur)	2 Quartiers (préconisations fabricants)	Sans
2	<30% (bois partiellement séché)	Résineux (ressources disponibles – pratiques pays nordiques)	1 Quartier (pratiques)	Avec

 Unité technique	Document de travail	Page 15/15
	<h1>Rapport d'Etude Technique</h1>	
Créé le 20/01/2015 M. à J. le 20/01/2015		

6 Bibliographie

- [1] CREDOC, «Enquête Resofop,» 2009.
- [2] d. l. e. d. l. f. Ministère de l'agriculture, «Agreste».
- [3] IGN, «IFN Inventaire forestier national,» 2012.
- [4] d. d. d. e. d. l. Ministère de l'écologie, «Chiffres clés des énergies renouvelables,» 2013.
- [5] Observ'ER, «Suivi du marché des appareils domestiques de chauffage au bois,» 2013.
- [6] BVA, «Le chauffage au bois : marchés et approvisionnements,» 2013.
- [7] S. F. Agency, Swedish Statistical Yearbook of Forestry.

2015

LERMAB

Benoit BRANDELET
Caroline ROGAUME

[CARACTERISATION DES COMBUSTIBLES, PROJET QUALICOMB]

Ce rapport présente les résultats relatifs à la caractérisation des combustibles sélectionnés dans le cadre du projet QUALICOMB

Contenu

1. Humidité.....	2
2. Taux de cendre	3
3. Analyse élémentaire.....	4
4. Pouvoir calorifique	5

Table des illustrations

Tableau 1 : Caractérisation de l'humidité des combustibles	2
Tableau 2 : Caractérisation des taux de cendres à 550°C et 815°C des combustibles.....	3
Tableau 3 : Caractérisation de la composition élémentaire des combustibles	4
Tableau 4 : Caractérisation des pouvoirs calorifiques des combustibles.....	5

1. Humidité

La caractérisation de l'humidité a été effectuée pour chacun des combustibles sélectionnés. Chaque analyse portait sur une quantité minimale de 50g de combustible et a été répétée trois fois. Seule la moyenne est reportée dans ce rapport. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1 suivant.

Groupe	Combustibles	Humidité (% sur brut)		
		Bois	Ecorce	Mixte / Galette
Groupe 1	Hêtre avec écorce H1	21,64	18,66	21,35
	Hêtre avec écorce H2	14,02	14,77	14,1
	Chêne Sec Sans Ecorce	X	X	9,61
	Chêne Sec Avec Ecorce	X	X	10,8
	Chêne Humide Sans Ecorce	X	X	27,95
	Chêne Humide Avec Ecorce	X	X	15,43
	Erable avec écorce H1	10,48	12,53	10,69
	Erable avec écorce H2	12,08	11,69	12,04
Groupe 2	Merisier avec écorce H1	X	X	42,57
	Merisier avec écorce H2	X	X	12,37
	Prunier avec écorce	X	X	21,72
Groupe 3	Tremble avec écorce H1	20,77	13,53	20,27
	Tremble avec écorce H2	13,95	4,28	13,29
	Saule avec écorce	9,18	12,29	9,68
Hors groupe	Résineux Sec Avec Ecorce	X	X	13,15
	Résineux Humide Avec Ecorce	X	X	47,52

Tableau 1 : Caractérisation de l'humidité des combustibles

Les humidités étudiées sont très variées, avec un minimum à 9,61% pour du chêne sec et un maximum de 47,42% pour un résineux humide.

2. Taux de cendre

Les caractérisations des taux de cendre à 550°C et 815°C des combustibles ont été réalisées sur des quantités minimales de 75g et répétées trois fois chacune. Le Tableau 2 présente les résultats de ces analyses.

Groupe	Combustibles	Taux de cendres à 550°C (%)			Taux de cendres à 815°C (%)		
		Bois	Ecorce	Mixte / Galette	Bois	Ecorce	Mixte / Galette
Groupe 1	Hêtre avec écorce H1	0,27	2,8	0,51	0,14	1,7	0,29
	Hêtre avec écorce H2	0,25	2,86	0,51	0,12	1,82	0,29
	Chêne Sec Sans Ecorce	X	X	0,37	X	X	0,19
	Chêne Sec Avec Ecorce	X	X	0,73	X	X	0,61
	Chêne Humide Sans Ecorce	X	X	0,91	X	X	0,10
	Chêne Humide Avec Ecorce	X	X	0,98	X	X	0,69
	Erable avec écorce H1	0,2	3,29	0,53	0,11	2	0,31
	Erable avec écorce H2	0,23	3,18	0,44	0,13	1,97	0,26
Groupe 2	Merisier avec écorce H1	X	X	0,33	X	X	0,25
	Merisier avec écorce H2	X	X	0,31	X	X	0,24
	Prunier avec écorce	X	X	0,56	X	X	0,37
Groupe 3	Tremble avec écorce H1	0,22	2,98	0,41	0,17	2,01	0,30
	Tremble avec écorce H2	0,21	2,92	0,40	0,17	1,98	0,29
	Saule avec écorce	0,25	1,95	0,52	0,24	1,18	0,39
Hors groupe	Résineux Sec Avec Ecorce	X	X	0,67	X	X	0,56
	Résineux Humide Avec Ecorce	X	X	0,95	X	X	0,67

Tableau 2 : Caractérisation des taux de cendres à 550°C et 815°C des combustibles

Les taux de cendres des combustibles sont classiques. L'analyse à 550°C présente des résultats toujours inférieurs à 1% et celle à 815°C inférieurs 0,5%. Seul les résineux semblent posséder un taux de cendre à 815°C plus élevé que la moyenne, mais tout de même inférieur à 0,7%.

3. Analyse élémentaire

Une analyse élémentaire des combustibles a été réalisée. Le Tableau 3 récapitule les résultats de ces analyses.

Groupe	Combustibles	C (% sur sec)	H (% sur sec)	O (% sur sec)	N (% sur sec)	S (mg/kg sur sec)	Cl (mg/kg sur sec)
Groupe 1	Hêtre bois	49,50	5,91	43,80	0,30	108,00	64,00
	Hêtre écorce	44,40	4,80	42,30	0,75	373,00	98,00
	Hêtre mixte	49,01	5,80	43,66	0,34	133,44	67,26
	Chêne	48,80	5,86	44,10	0,30	137,00	27,00
	Erable bois	49,40	5,95	43,80	0,30	102,00	66,00
	Erable écorce	45,00	4,73	40,10	0,79	469,00	43,00
	Erable mixte	48,93	5,82	43,41	0,35	140,90	63,56
Groupe 2	Merisier	50,20	5,76	43,00	0,30	123,00	98,00
	Prunier	50,30	5,66	42,30	0,30	155,00	47,00
Groupe 3	Tremble bois	50,90	5,80	42,90	0,30	114,00	51,00
	Tremble écorce	47,60	4,83	46,59	0,98	486,00	67,00
	Tremble mixte	50,67	5,73	43,15	0,35	139,67	52,10
	Saule bois	50,20	5,82	42,30	0,30	521,00	143,00
	Saule écorce	47,20	4,71	38,90	1,27	970,00	73,00
	Saule mixte	49,72	5,64	41,76	0,45	592,39	131,87
Hors groupe	Résineux	51,90	6,23	41,30	0,30	96,00	64,00

Tableau 3 : Caractérisation de la composition élémentaire des combustibles

4. Pouvoir calorifique

La caractérisation du pouvoir calorifique supérieur a été effectuée pour chacun des combustibles. Chaque analyse a été répétée trois fois. Seule la moyenne est reportée dans ce rapport. Les calculs du PCI et du PCIh sont effectués à l'aide des caractéristiques (humidité et teneur en hydrogène) des combustibles décrites dans les parties précédentes. Le Tableau 4 synthétise les résultats obtenus.

Groupe	Combustibles	PCS (kj/kg)			Teneur en H (%)	PCIs du mixte (kj/kg)	Humidité sur brute (%)	PCIh du mixte (kj/kg)
		Bois	Ecorce	Mixte / Galette				
Groupe 1	Hêtre avec écorce H1	19308	17832	19166	5,8	17856	21,35	13510
	Hêtre avec écorce H2	19308	17832	19163	5,8	17853	14,1	14983
	Chêne Sec Sans Ecorce	X	X	19152	5,86	17828	9,61	15874
	Chêne Sec Avec Ecorce	X	X	19026	5,86	17702	10,8	15520
	Chêne Humide Sans Ecorce	X	X	19446	5,86	18122	27,95	12358
	Chêne Humide Avec Ecorce	X	X	18858	5,86	17534	15,43	14442
	Erable avec écorce H1	20215	16369	19807	5,82	18492	10,69	16248
Erable avec écorce H2	20215	16369	19942	5,82	18627	12,04	16083	
Groupe 2	Merisier avec écorce H1	X	X	19858	5,76	18556	42,57	9593
	Merisier avec écorce H2	X	X	19858	5,76	18556	12,37	15952
	Prunier avec écorce	X	X	19696	5,66	18417	21,72	13874
Groupe 3	Tremble avec écorce H1	19454	17366	19310	5,73	18015	20,27	13857
	Tremble avec écorce H2	19454	17366	19310	5,73	18015	13,29	15289
	Saule avec écorce	19669	17427	19313	5,64	18038	9,68	16050
Hors groupe	Résineux Sec Avec Ecorce	X	X	19786	6,23	18378	13,15	15633
	Résineux Humide Avec Ecorce	X	X	19114	6,23	17706	47,52	8104

Tableau 4 : Caractérisation des pouvoirs calorifiques des combustibles

RAPPORT D'ESSAI

N°1733

 Vérifié par le
 Responsable Qualité

 Approuvé par le
 Directeur du Laboratoire


Laboratoire CERIC



Laboratoire CERIC
 CS 50016
 79270 SAINT SYMPHORIEN
 Tél : 05 49 09 53 92
 Fax 05 49 09 50 05
 info@laboratoire-ceric.com
 www.laboratoire-ceric.com



Client	Société : CERIC Adresse : CS 50016 79270 Saint Symphorien Téléphone : 05 49 09 53 92 Demandeur : L. DRUETTE
Essai	Nature et référentiel : Mesure de poussière (Projet ADEME QUALICOMB)
Echantillon	Type : Appareils de chauffage au bois domestiques Description : Foyer SUNFLAM et poêle SAPHIR (SEGUIN DUTERIEZ)

 Rapport d'essai établi par
 J. LANDREAU

 Rapport d'essai validé par
 L. DRUETTE

Fonction :

Datez et signez

Fonction :

Datez et signez

Ingénieur

Directeur CERIC



Le laboratoire CERIC est le laboratoire première partie de POUJOLAT SA.
 Ce rapport d'essais atteste uniquement des caractéristiques de l'échantillon soumis aux essais et ne préjuge pas des caractéristiques de produits similaires. Il ne constitue donc pas une certification de produit au sens de l'article L 115-27 du code de la consommation et de la loi du 3 juin 1994. Pour déclarer ou non la conformité à la spécification, il n'a pas été tenu explicitement compte de l'incertitude associée au résultat.
 La reproduction de ce document n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral.
 L'accréditation par le Cofrac atteste de la compétence du laboratoire pour les seuls essais et analyses repérés par le symbole * sur le présent document.
 Le Cofrac est signataire de l'accord multilatéral de EA (European co-operation for Accreditation) et d'ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) de reconnaissance de l'équivalence des rapports d'essais ou d'analyses.

Contenu

Contenu	2
1 Introduction	3
2 Les échantillons	4
2.1 Les appareils de chauffage au bois	4
2.2 Les combustibles	6
3 Description des essais	7
3.1 Essais insert	7
3.2 Essais poêle	7
3.3 Mesures	7
4 Résultats	9
4.1 Essais insert	9
4.2 Essais poêle	11
4.3 Synthèse des résultats	13

1 Introduction

Dans le cadre du projet ADEME QUALICOMB (convention n° 1301C0049), des essais de combustion sont réalisés sur deux appareils de chauffage au bois domestiques. Ces appareils sont un insert d'ancienne génération et un poêle performant (Flamme Verte 5*). L'objectif de ces essais est d'observer les performances des appareils en fonction de la qualité du combustible utilisé et des pratiques des utilisateurs.

Ce rapport d'essais concerne l'étape n°1 de la tâche 3 du projet QUALICOMB (voir détails).

Un plan d'expérience préalablement établi a permis de définir les 8 essais différents qui ont été réalisés dans le cadre de cette première campagne. L'analyse des résultats ne pourra se faire qu'une fois l'ensemble des résultats réalisés.

La tâche n°3 est décrite par les critères suivants :

Objectifs :	Essais et tests – Mesure des performances des appareils (quatre appareils représentatifs du marché) obtenues avec les combustibles retenus	
Responsable :	LERMAB	
Partenaires :	CERIC, SEGUIN DUTERIEZ, D2I / INVICTA	
Programme détaillé :	1 : Essais Fabricants de foyers (essais normalisés)	SEGUIN DUTERIEZ / CERIC : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 8 essais selon plan d'expériences Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines. INVICTA / CERIC : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 8 essais selon plan d'expériences Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines.
	2 : Essais CERIC (conditions réelles)	CERIC : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 20 essais selon plan d'expériences Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines. Une réunion suite à cette sous-tâche aura pour objectif de définir les conditions d'essais retenues pour les essais approfondis. Ceci permettra de cibler la suite du projet sur les essais les plus pertinents.
	3 : Essais LERMAB (essais approfondis)	LERMAB : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 20 essais Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines, PM10, PM2.5, PM1, HAP, COV.

Remarques :

- Les résultats obtenus sont donnés sans analyse.
- Le rendement est donné à titre indicatif, il fera l'objet par la suite d'ajustements, suite aux analyses des combustibles (tâche 2). Pour ce rapport, les caractéristiques des combustibles qui ont été utilisées pour le calcul des rendements ont été arbitrairement fixées à :

Caractéristiques du combustible H1		
PCI du combustible	15090	Kj/kg
Humidité du combustible	16	%
Teneur en H du combustible	5	%
Teneur en C du combustible	42	%
Teneur en Cr des résidus	0,09	%

Caractéristiques du combustible H2		
PCI du combustible	12362	Kj/kg
Humidité du combustible	28	%
Teneur en H du combustible	5	%
Teneur en C du combustible	42	%
Teneur en Cr des résidus	0,07	%

2 Les échantillons

2.1 Les appareils de chauffage au bois

Foyer modèle SUNFLAM	Poêle modèle SAPHIR
	
<p>Puissance = 12 KW Rendement = 73,2 % CO (à 13% d'O₂) = 0,25% Température de fumée = 302°C</p>	<p>Puissance = 9 KW Rendement = 79 % CO (à 13% d'O₂) = 0,11% Température de fumée = 322°C</p>

Réglages d'air pour l'insert SUNFLAM:

Bonne utilisation :

Ouverture 25% (20 mm)

Manque d'air :

Ouverture 0%



Réglages d'air pour le poêle SAPHIR:

Bonne utilisation :

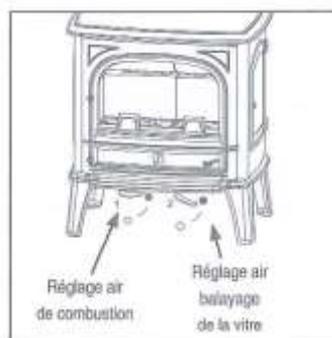
Air de combustion 0%

Balayage de la vitre 100%

Manque d'air :

Air de combustion 0%

Balayage de la vitre 0%



2.2 Les combustibles

Pour ces essais, des bûches de caractéristiques variées sont utilisées :

Paramètres et niveaux :

Essence	G1 – Chêne / Hêtre	G2 – Sapin
Humidité	H1 – 17%	H2 – 28%
Ecorce	Avec	Sans



Exemple : G1-H1- avec écorce



Exemple : G1-H1- sans écorce



Exemple : G2-H1- sans écorce

3 Description des essais

Lors de cette campagne, les essais suivants ont été réalisés en condition de tirage stabilisé (12 Pa):

3.1 Essais insert

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 17	G1	H1	2 bûches	Sans	Bonne Manque	4,1
exp 9	G1	H1	2 bûches	Sans	d'air	4,1
exp 20	G2	H1	2 bûches	Sans	Bonne Manque	4,1
exp 26	G1	H1	2 bûches	Sans	d'air	4,1

Les bûches utilisées sont de longueur 40 cm.

3.2 Essais poêle

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 1	G1	H1	2 bûches	Sans	Bonne	2,7
exp 21	G1	H1	2 bûches	Avec	Bonne Manque	2,7
exp 25	G1	H1	2 bûches	Sans	d'air	2,7
exp 4	G1	H2	1 bûche	Avec	Bonne	3,2

Les bûches utilisées sont de longueur 30 cm.

3.3 Mesures

Les grandeurs mesurées sont les suivantes :

Analyseur de combustion ECOM JF (SEGUIN DUTERIEZ)

- CO,
- CO₂,
- O₂,
- température de l'air,
- température de fumée

Ces données sont ensuite utilisées pour le calcul du rendement selon la norme NF EN 13229.

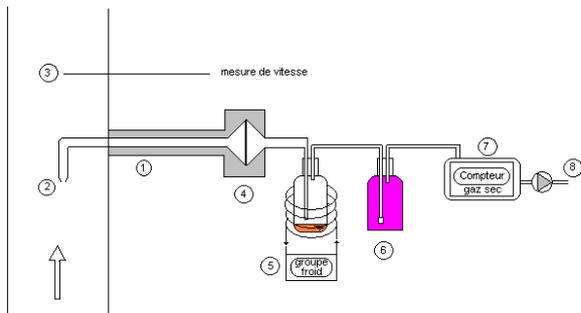


Banc de mesure de poussière sur filtre chauffé (CERIC) :

Note relative à la mesure de poussière sur filtre chauffé :

La concentration de poussières est estimée à l'aide de la méthode NF EN 13284-1. Il s'agit de prélever un volume de fumées compris entre 500 et 600 l pendant une durée de 60 minutes, sur un porte filtre chauffé à 160 °C et avec une buse de prélèvement de diamètre 10 mm.

L'obtention de la concentration provient du résultat de la pesée de filtre avant et après le prélèvement divisé par le volume de gaz prélevé. Les valeurs seront réajustées pour être exprimées en mg /Nm³ et ramenées à 13 % O₂.



4 Résultats

4.1 Essais insert

Expérience n°17 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 17	G1	H1	2 bûches	Sans	Bonne	4,1



		POUSSIÈRES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3	Conso. Bois	O2	CO2	CO	Ambiant	Tronçon	η
n°	kg		à 13% O2	kg	%	%	ppm à 13%	°C	°C	%
01	4,13	79,98	124,12	3,39	15,81	5,02	1506	28,28	269,91	59,38
02	4,14	51,21	71,52	3,26	15,24	5,55	2320	29,76	282,15	62,10
03	4,14	67,46	78,38	3,54	14,10	6,67	2188	30,52	325,99	64,97
Moyenne	4,14	66,22	91,34	3,40	15,05	5,75	2004,47	29,52	292,68	62,15

Expérience n°20 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 20	G2	H1	2 bûches	Sans	Bonne	4,1



		POUSSIÈRES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3	Conso. Bois	O2	CO2	CO	Ambiant	Tronçon	η
n°	kg		à 13% O2	kg	%	%	ppm à 13%	°C	°C	%
05	4,178	90,42	107,03	3,42	14,23	6,56	3623	24,30	321,98	63,95
06	4,134	85,26	121,75	3,51	15,37	5,45	823	26,34	287,14	64,96
07	4,162	55,86	78,23	3,28	15,26	5,56	882	28,05	294,48	64,02
Moyenne	4,158	77,18	102,34	3,40	14,95	5,85	1776,15	26,23	301,20	64,31

Expérience n°09 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 9	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	4,1



		POUSSIERES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3	Conso. Bois	O2	CO2	CO	Ambiant	Tronçon	η
n°	kg		à 13% O2	kg	%	%	ppm à 13%	°C	°C	%
08	4,156	77,98	132,75	2,80	16,26	4,60	1694	29,77	254,16	63,32
09	4,128	65,44	85,32	3,41	14,84	5,79	982	30,81	299,96	63,33
10	4,121	41,72	47,59	3,28	13,97	6,80	1233	31,42	335,71	65,29
Moyenne	4,135	61,72	88,56	3,16	15,02	5,73	1302,85	30,67	296,61	63,98

Expérience n°26 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 26	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	4,1



		POUSSIERES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3	Conso. Bois	O2	CO2	CO	Ambiant	Tronçon	η
n°	kg		à 13% O2	kg	%	%	ppm à 13%	°C	°C	%
11	4,112	63,23	76,87	3,51	14,40	6,38	1635	32,45	321,35	64,78
12	4,128	77,63	135,80	2,79	16,38	4,42	2495	32,36	259,28	57,57
04	4,118	37,46	48,42	3,70	14,79	6,02	793	31,52	314,31	65,14
Moyenne	4,119333	59,44	87,03	3,33	15,19	5,61	1641,11	32,11	298,31	62,50

4.2 Essais poêle

Expérience n°01 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 1	G1	H1	2 bûches	Sans	Bonne	2,7



		POUSSIÈRES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3	Conso. Bois	O2	CO2	CO	Ambiant	Tronçon	η
n°	kg		à 13% O2	kg	%	%	ppm à 13%	°C	°C	%
13	2,724	25,18	26,23	2,36	13,31	7,44	771	24,77	287,45	73,39
14	2,721	45,25	46,12	2,28	13,15	7,59	685	27,87	282,67	74,03
15	2,68	6,14	6,47	2,14	13,40	7,34	739	29,67	278,81	74,60
Moyenne	2,708333	25,53	26,27	2,26	13,29	7,45	731,73	27,44	282,98	74,01

Expérience n°21 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 21	G1	H1	2 bûches	Avec	Bonne	2,7



		POUSSIÈRES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3	Conso. Bois	O2	CO2	CO	Ambiant	Tronçon	η
n°	kg		à 13% O2	kg	%	%	ppm à 13%	°C	°C	%
16	2,694	16,72	20,65	2,19	14,50	6,29	1772	24,13	274,93	72,69
17	2,727	24,36	33,68	1,65	15,19	5,64	854	25,80	256,25	71,06
18	2,726	25,90	37,16	1,95	15,39	5,37	935	26,15	243,74	70,10
Moyenne	2,715667	22,33	30,49	1,93	15,03	5,77	1187,02	25,36	258,31	71,28

Expérience n°25 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 25	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	2,7



		POUSSIÈRES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai n°	Charge kg	mg/Nm3	mg/Nm3 à 13% O2	Conso. Bois kg	O2 %	CO2 %	CO	Ambiant °C	Tronçon °C	η %
							ppm à 13%			
19	2,729	22,06	23,04	1,79	13,34	7,40	1929	18,31	207,15	76,96
20	2,7	58,67	79,98	1,72	15,10	5,70	2298	19,90	192,08	73,18
21	2,727	67,53	117,07	1,51	16,34	4,45	1338	20,21	174,80	72,16
Moyenne	2,718667	49,42	73,36	1,67	14,93	5,85	1854,67	19,48	191,34	74,10

Expérience n°04 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 4	G1	H2	1 bûche	Avec	Bonne	3,2



		POUSSIÈRES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai n°	Charge kg	mg/Nm3	mg/Nm3 à 13% O2	Conso. Bois kg	O2 %	CO2 %	CO	Ambiant °C	Tronçon °C	η %
							ppm à 13%			
22	3,197	72,05	220,44	1,34	18,32	2,58	8397	23,30	206,09	34,63
23	3,218	75,21	154,80	1,80	17,06	3,81	3360	24,20	236,37	51,63
24	3,194	84,12	209,95	1,55	17,73	3,15	5371	25,22	228,88	41,47
Moyenne	3,203	77,13	195,06	1,56	17,70	3,18	5709,62	24,24	223,78	42,58

4.3 Synthèse des résultats

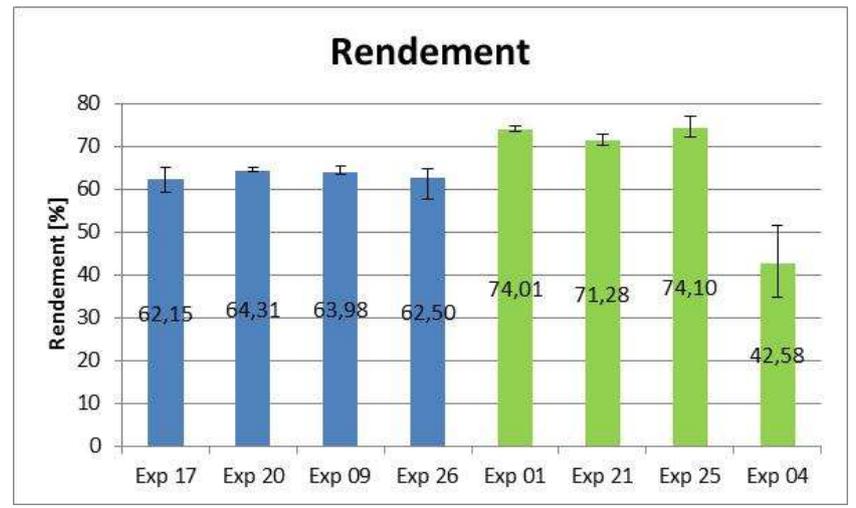
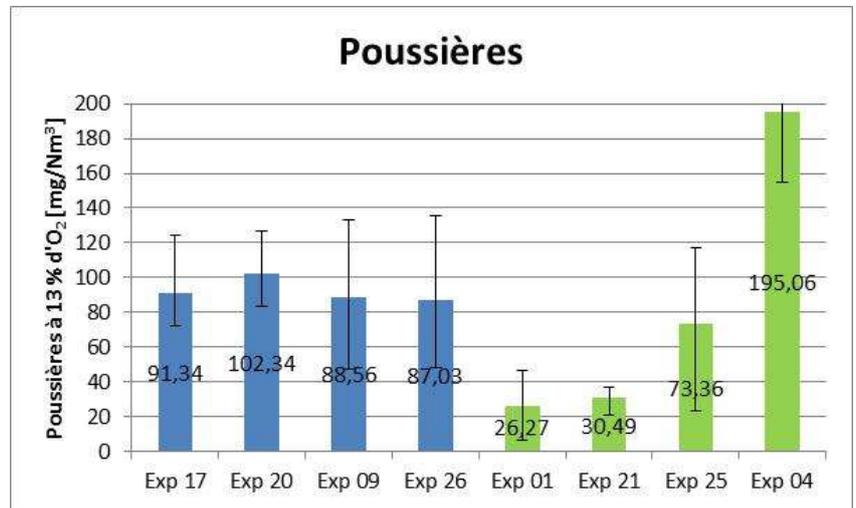
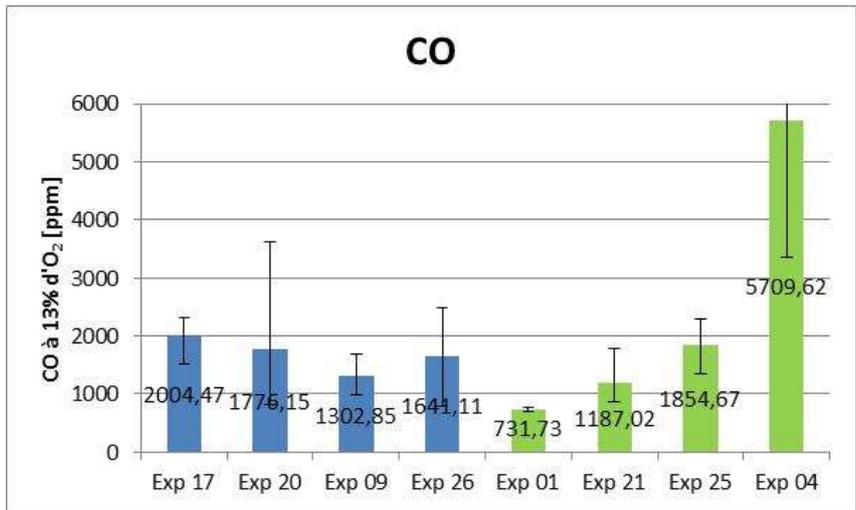
Essais insert :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 17	G1	H1	2 bûches	Sans	Bonne	4,1
exp 20	G2	H1	2 bûches	Sans	Bonne	4,1
exp 9	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	4,1
exp 26	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	4,1

Essais poêle :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 1	G1	H1	2 bûches	Sans	Bonne	2,7
exp 21	G1	H1	2 bûches	Avec	Bonne	2,7
exp 25	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	2,7
exp 4	G1	H2	1 bûche	Avec	Bonne	3,2

Tout	POUSSIÈRES	PRELEVEMENT	COMBUSTION							
Essai n°	mg/Nm3 à 13% O2	Conso. Bois kg	O2 %	CO2 %	CO ppm à 13%	Ambiant °C	Tronçon °C	η %	Débit calorifique [kW]	Puissance [kW]
Exp 17	91,34	3,40	15,05	5,75	2004,47	29,52	292,68	62,15	13,8	8,6
Exp 20	102,34	3,40	14,95	5,85	1776,15	26,23	301,20	64,31	13,8	8,9
Exp 09	88,56	3,16	15,02	5,73	1302,85	30,67	296,61	63,98	12,9	8,2
Exp 26	87,03	3,33	15,19	5,61	1641,11	32,11	298,31	62,50	13,5	8,5
Exp 01	26,27	2,26	13,29	7,45	731,73	27,44	282,98	74,01	9,2	6,8
Exp 21	30,49	1,93	15,03	5,77	1187,02	25,36	258,31	71,28	7,8	5,6
Exp 25	73,36	1,67	14,93	5,85	1854,67	19,48	191,34	74,10	6,8	5,0
Exp 04	195,06	1,56	17,70	3,18	5709,62	24,24	223,78	42,58	5,4	2,3



----- Fin du rapport -----

RAPPORT D'ESSAI

N°1750

Vérifié par le
Responsable QualitéApprouvé par le
Directeur du Laboratoire

LABORATOIRE CERIC
CS 50016
79270 SAINT-SYMPHORIEN
TÉL. 05 49 09 53 92
FAX 05 49 09 50 05
info@laboratoire-ceric.com
www.laboratoire-ceric.com



Demandeur : Lionel DRUETTE

Adresse : Laboratoire CERIC
CS50016
79270 SAINT SYMPHORIEN

Poêles INVICTA

Mesure de poussière (projet ADEME QUALICOMB)

Référentiel(s) : /

Rapport rédigé par : Julien LANDREAU
Le : 29/10/2014Rapport validé par : Lionel DRUETTE
Fonction : Directeur du laboratoire CERIC

Date :

Signature :

Le laboratoire CERIC est le laboratoire première partie de POUJOULAT S. Ce rapport d'essais atteste uniquement des caractéristiques de l'échantillon soumis aux essais et ne préjuge pas des caractéristiques de produits similaires. Il ne constitue donc pas une certification de produit au sens de l'article L 115-27 du code de la consommation et de la loi du 3 juin 1994. Pour déclarer ou non la conformité à la spécification, il n'a pas été tenu explicitement compte de l'incertitude associée au résultat. La reproduction de ce document n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral.

Contenu

1	Introduction	3
2	Les échantillons.....	5
2.1	Les appareils de chauffage au bois	5
2.2	Les combustibles.....	7
3	Description des essais	8
3.1	Essais insert.....	8
3.2	Essais poêle	8
3.3	Mesures	9
4	Résultats.....	10
4.1	Essais VOLGA.....	10
4.2	Essais WABI	13
4.3	Synthèse des résultats	16

1 Introduction

Dans le cadre du projet ADEME QUALICOMB (convention n° 1301C0049), des essais de combustion sont réalisés sur deux appareils de chauffage au bois domestiques. Ces appareils sont un poêle à bûches d'ancienne génération et un poêle performant (Flamme Verte 5*). L'objectif de ces essais est d'observer les performances des appareils en fonction de la qualité du combustible utilisé et des pratiques des utilisateurs.

Ce rapport d'essais concerne la seconde série d'essais de l'étape n°1 de la tâche 3 du projet QUALICOMB (voir détails).

Un plan d'expérience préalablement établi a permis de définir les 8 essais différents qui ont été réalisés dans le cadre de cette deuxième campagne. L'analyse des résultats ne pourra se faire qu'une fois l'ensemble des résultats réalisés.

Ces essais se sont déroulés dans le laboratoire D2I situé à Vivier au Court (08).

La tâche n°3 est décrite par les critères suivants :

Objectifs :	Essais et tests – Mesure des performances des appareils (quatre appareils représentatifs du marché) obtenues avec les combustibles retenus	
Responsable :	LERMAB	
Partenaires :	CERIC, SEGUIN DUTERIEZ, D2I / INVICTA	
Programme détaillé :	1 : Essais Fabricants de foyers (essais normalisés)	SEGUIN DUTERIEZ / CERIC : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 8 essais selon plan d'expériences Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines.
		INVICTA / CERIC : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 8 essais selon plan d'expériences Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines.
	2 : Essais CERIC (conditions réelles)	CERIC : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 20 essais selon plan d'expériences Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines.
		Une réunion suite à cette sous-tâche aura pour objectif de définir les conditions d'essais retenues pour les essais approfondis. Ceci permettra de cibler la suite du projet sur les essais les plus pertinents.
3 : Essais LERMAB (essais approfondis)	LERMAB : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 20 essais Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines, PM10, PM2.5, PM1, HAP, COV.	

Remarques :

- Les résultats obtenus sont donnés sans analyse.
- Le rendement est donné à titre indicatif, il fera l'objet par la suite d'ajustements, suite aux analyses des combustibles (tâche 2). Pour ce rapport, les caractéristiques des combustibles qui ont été utilisées ont été arbitrairement fixées à :

<u>Caractéristiques du combustible H1</u>		
PCI du combustible	15090	Kj/kg
Humidité du combustible	16	%
Teneur en H du combustible	5	%
Teneur en C du combustible	42	%
Teneur en Cr des résidus	0,09	%

<u>Caractéristiques du combustible H2</u>		
PCI du combustible	12362	Kj/kg
Humidité du combustible	28	%
Teneur en H du combustible	5	%
Teneur en C du combustible	42	%
Teneur en Cr des résidus	0,07	%

2 Les échantillons

2.1 Les appareils de chauffage au bois

Poêle ancien modèle VOLGA



Valeurs déclarées :

Puissance = 10 kW

Rendement = 70,0 %

CO (à 13% d'O₂) = 0,3%

Température de fumée = 261°C

Poêle modèle WABI



Valeurs déclarées :

Puissance = 6 kW

Rendement = 79 %

CO (à 13% d'O₂) = 0,05%

Température de fumée = 282°C

Réglages d'air pour le poêle VOLGA:

Bonne utilisation :

Air secondaire au milieu

Registre de réglage d'allure (sous la porte) au milieu



Manque d'air :

Air secondaire au milieu

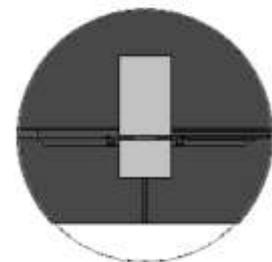
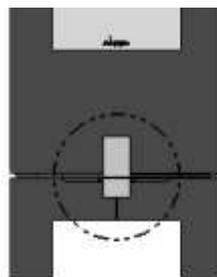
Registre de réglage d'allure (sous la porte) fermé



Réglages d'air pour le poêle WABI:

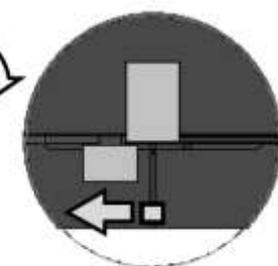
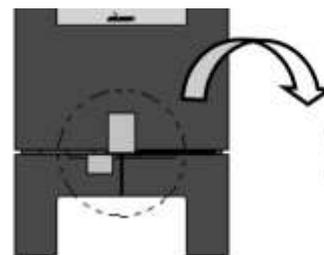
Bonne utilisation :

Registre centré



Manque d'air :

Registre à gauche



2.2 Les combustibles

Pour ces essais, des bûches de caractéristiques variées sont utilisées :

Paramètres et niveaux :

Essence	G1 – Chêne / Hêtre	G2 – Sapin
Humidité	H1 – 17%	H2 – 28%
Ecorce	Avec	Sans



Exemple : G1-H1- avec écorce



Exemple : G1-H1- sans écorce



Exemple : G2-H1- sans écorce

3 Description des essais

Lors de cette campagne, les essais suivants ont été réalisés en condition de tirage stabilisé (12 Pa):

3.1 Essais appareil d'ancienne génération

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 17	G1	H1	2 bûches	Sans	Bonne	2,5
exp 9	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	2,5
exp 20	G2	H1	2 bûches	Sans	Bonne	2,5
exp 26	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	2,5

Les bûches utilisées sont de longueur 40 cm.

3.2 Essais poêle

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 1	G1	H1	2 bûches	Sans	Bonne	1,4
exp 21	G1	H1	2 bûches	Avec	Bonne	1,4
exp 25	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	1,4
exp 4	G1	H2	1 bûche	Avec	Bonne	2,5

Les bûches utilisées sont de longueur 25 cm.

3.3 Mesures

Les grandeurs mesurées sont les suivantes :

Analyses réalisées par D2I :

- CO,
- CO₂,
- O₂,
- température de l'air,
- température de fumée

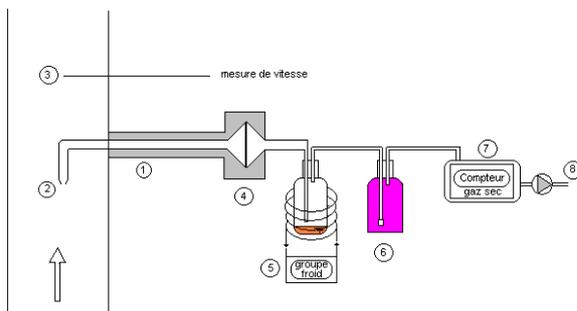
Ces données sont ensuite utilisées pour le calcul du rendement selon les normes NF EN 13229 et NF EN 13240 (calculs réalisés par D2I).

Banc de mesure de poussière sur filtre chauffé (CERIC) :

Note relative à la mesure de poussière sur filtre chauffé :

La concentration de poussières est estimée à l'aide de la méthode NF EN 13284-1. Il s'agit de prélever un volume de fumées compris entre 500 et 600 l pendant une durée de 60 minutes, sur un porte filtre chauffé à 160 °C et avec une buse de prélèvement de diamètre 10 mm.

L'obtention de la concentration provient du résultat de la pesée de filtre avant et après le prélèvement divisé par le volume de gaz prélevé. Les valeurs seront réajustées pour être exprimées en mg /Nm³ et ramenées à 13 % O₂.



4 Résultats

4.1 Essais VOLGA

Expérience n°17 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 17	G1	H1	2 bûches	Sans	Bonne	2,5



17		POUSSIERES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3	Conso. Bois	O2	CO2	CO	Ambiant	Tronçon	η
n°	kg		à 13% O2	kg	%	%	ppm à 13%	°C	°C	%
03	2,51	65,66	52,22	2,52	10,97	9,70	4146	25,30	323,00	72,80
04	2,52	91,29	61,14	2,46	9,10	11,50	5581	25,60	357,00	73,00
Moyenne	2,52	78,48	56,68	2,49	10,03	10,60	4863,58	25,45	340,00	72,90

Remarque : Les essais n°01 et n°02 n'ont pas été pris en compte à cause d'une coupure électrique sur la plate-forme d'essais.

Expérience n°20 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 20	G2	H1	2 bûches	Sans	Bonne	2,5



20		POUSSIERES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3 à 13% O2	Conso. Bois kg	O2 %	CO2 %	CO ppm à 13%	Ambiant °C	Tronçon °C	η %
n°	kg									
06	2,46	156,75	115,06	2,52	10,14	10,50	3830	22,00	378,00	70,00
07	2,45	113,72	85,95	2,46	10,45	10,20	2957	23,20	362,00	71,20
Moyenne	2,46	135,23	100,51	2,49	10,29	10,35	3393	22,60	370,00	70,60

Expérience n°09 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 9	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	2,5



9		POUSSIERES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3 à 13% O2	Conso. Bois kg	O2 %	CO2 %	CO ppm à 13%	Ambiant °C	Tronçon °C	η %
n°	kg									
08	2,46	69,23	55,05	2,52	10,97	9,70	4066	23,80	329,00	72,30
09	2,52	100,89	88,53	2,46	11,90	8,80	5536	24,10	302,00	71,20
10	2,48	218,03	184,93	2,54	11,59	9,10	6034	24,30	305,00	72,10
Moyenne	2,48	129,38	109,50	2,51	11,48	9,20	5212	24,07	312,00	71,87

Expérience n°26 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 26	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	2,5



26		POUSSIERES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3 à 13% O2	Conso. Bois kg	O2 %	CO2 %	CO ppm à 13%	Ambiant °C	Tronçon °C	η %
n°	kg									
11	2,49	189,17	178,27	2,52	12,52	8,20	5753	24,00	287,00	71,40
12	2,51	289,04	310,74	2,46	13,55	7,20	7304	23,40	258,00	71,20
Moyenne	2,50	239,10	244,51	2,49	13,03	7,70	6528	23,70	272,50	71,30

4.2 Essais WABI

Expérience n°01 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 1	G1	H1	2 bûches	Sans	Bonne	1,4



1		POUSSIERES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai n°	Charge kg	mg/Nm3	mg/Nm3 à 13% O2	Conso. Bois kg	O2 %	CO2 %	CO ppm à 13%	Ambiant °C	Tronçon °C	η %
13	1,39	14,81	11,65	1,40	10,86	9,80	868	19,30	331,00	73,60
14	1,43	5,23	4,39	1,20	11,48	9,20	420	20,20	332,00	72,30
15	1,41	6,46	5,19	1,24	11,07	9,60	1772	21,10	323,00	73,70
16	1,42	14,70	10,29	1,41	9,62	11,00	773	21,40	350,00	74,90
Moyenne	1,41	10,30	7,88	1,31	10,76	9,90	958	20,50	334,00	73,63

Remarques :

- Suite à des observations de la part du fabricant (valeurs de rendement inhabituelles) les essais n°13 à n°16 ont bénéficié d'ajustements : La réserve de braise a été portée à 1,0 kg à partir de la charge n°14 au lieu de 0,6 kg.
- Il a ensuite été décidé de réaliser un essai avec le combustible d'essais utilisé par D2I (charme 14 % d'humidité) pour vérifier les résultats obtenus dans ces conditions.

Ref. INVICTA : Essai complémentaire réalisé avec le combustible utilisé par D2I
(hors plan d'expérience)

		POUSSIERES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3	Conso. Bois	O2	CO2	CO	Ambiant	Tronçon	η
n°	kg		à 13% O2	kg	%	%	ppm à 13%	°C	°C	%
22	1,52	10,75	7,14	1,49	9,00	11,60	333	22,20	358,00	77,20

Expérience n°21 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 21	G1	H1	2 bûches	Avec	Bonne	1,4



21		POUSSIERES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3	Conso. Bois	O2	CO2	CO	Ambiant	Tronçon	η
n°	kg		à 13% O2	kg	%	%	ppm à 13%	°C	°C	%
17	1,43	15,72	12,63	1,30	11,07	9,60	1611	21,80	341,00	72,20
18	1,43	23,62	17,50	1,32	10,24	10,40	967	22,20	334,00	74,80
19	1,44	20,58	14,69	1,56	9,83	10,80	1146	22,50	348,00	73,70
Moyenne	1,43	19,97	14,94	1,39	10,38	10,27	1241	22,17	341,00	73,57

Expérience n°25 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 25	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	1,4



25		POUSSIÈRES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3	Conso. Bois	O2	CO2	CO	Ambiant	Tronçon	η
n°	kg	mg/Nm3	à 13% O2	kg	%	%	ppm à 13%	°C	°C	%
20	1,40	18,35	11,58	1,33	8,38	12,20	3106	22,50	325,00	77,20
21	1,42	10,62	7,72	1,29	10,03	10,60	2116	22,40	300,00	77,20
Moyenne	1,41	14,49	9,65	1,31	9,21	11,40	2611	22,45	312,50	77,20

Expérience n°04 :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 4	G1	H2	1 bûche	Avec	Bonne	1,4

Pour cet essai, la masse de réserve de braise a volontairement été augmentée à 1,2 kg de manière à assurer une inflammation correcte de la bûche. C'est pourquoi, nous observons une consommation de bois supérieure à la charge.

4		POUSSIÈRES		PRELEVEMENT	COMBUSTION					
Essai	Charge	mg/Nm3	mg/Nm3	Conso. Bois	O2	CO2	CO	Ambiant	Tronçon	η
n°	kg	mg/Nm3	à 13% O2	kg	%	%	ppm à 13%	°C	°C	%
23	1,43	29,00	30,74	2,59	13,45	7,30	5297	22,00	316,00	66,00
24	1,35	142,45	190,74	/	15,00	5,80	9067	22,50	256,00	65,30
Moyenne	1,39	85,73	110,74	2,59	14,22	6,55	7182	22,25	286,00	65,65

4.3 Synthèse des résultats

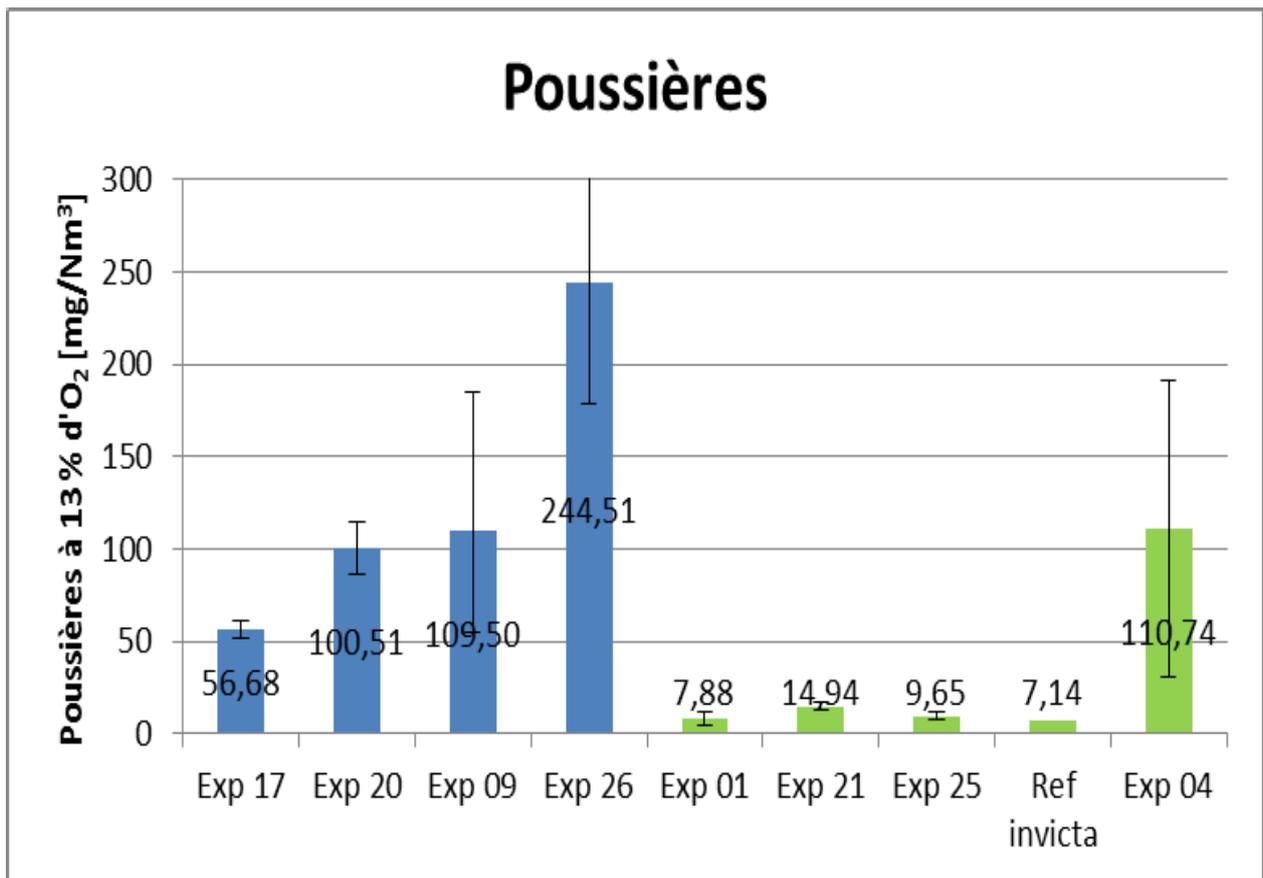
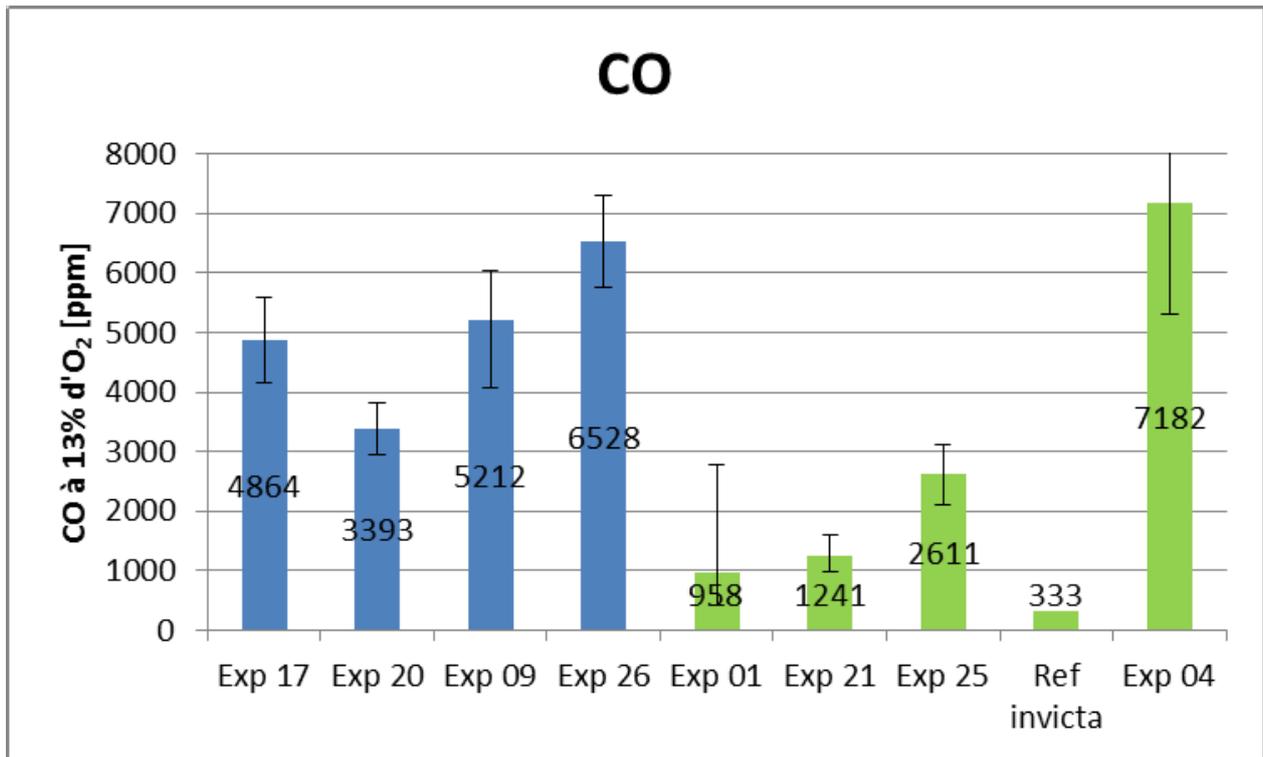
Essais VOLGA :

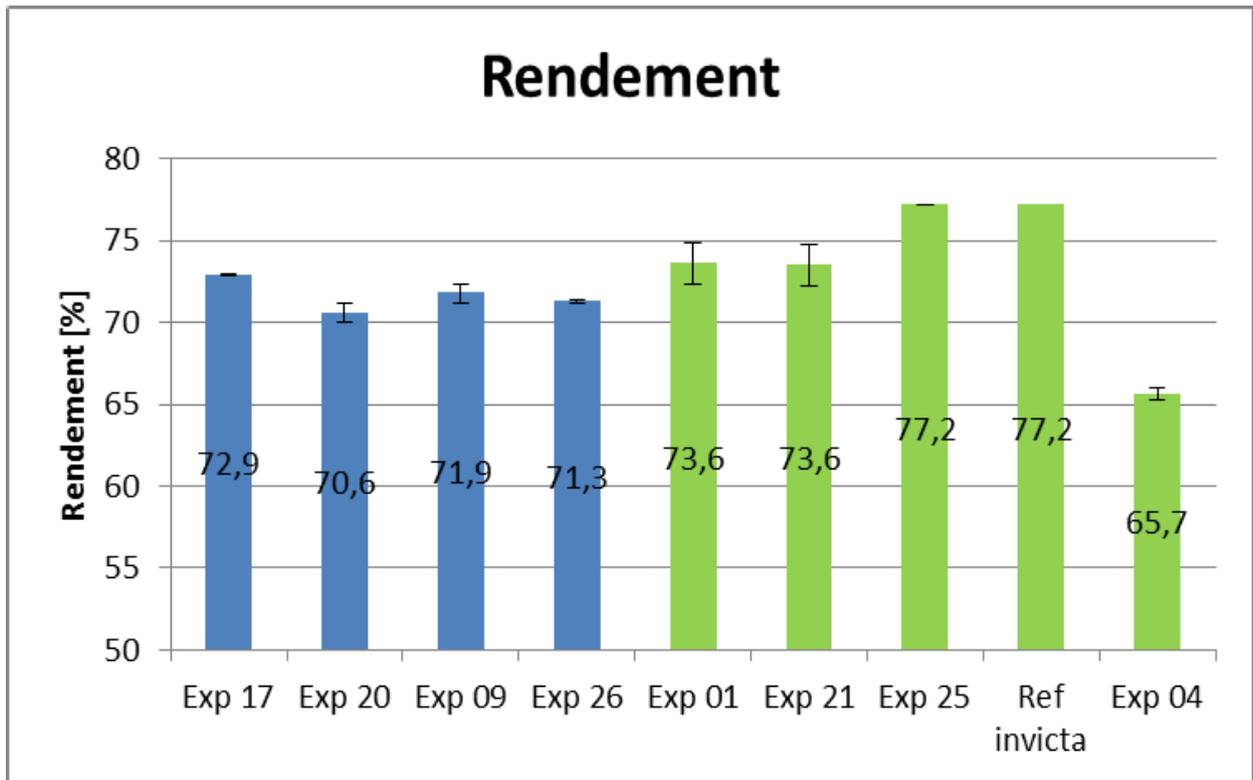
N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 17	G1	H1	2 bûches	Sans	Bonne	2,5
exp 20	G2	H1	2 bûches	Sans	Bonne	2,5
exp 9	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	2,5
exp 26	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	2,5

Essais WABI :

N° pl exp	Essence	Humidité	Calibre	Ecorce	Utilisation	Masse de combustible [kg]
exp 1	G1	H1	2 bûches	Sans	Bonne	1,4
exp 21	G1	H1	2 bûches	Avec	Bonne	1,4
exp 25	G1	H1	2 bûches	Sans	Manque d'air	1,4
exp 4	G1	H2	1 bûche	Avec	Bonne	2,5

Essai n°	POUSSIERES	PRELEVEMENT	COMBUSTION					Tronçon °C	η %	Puissance [kW]
	mg/Nm3 à 13% O2	Conso. Bois kg	O2 %	CO2 %	CO	Ambiant				
					ppm à 13%	°C				
Exp 17	56,68	2,39	10,0	10,6	4864	25,5	340	72,9	9,6	
Exp 20	100,51	2,43	10,3	10,4	3393	22,6	370	70,6	9,9	
Exp 09	109,50	2,51	11,5	9,2	5212	24,1	312	71,9	7,2	
Exp 26	244,51	2,43	13,0	7,7	6528	23,7	273	71,3	6,0	
Exp 01	7,88	1,24	10,8	9,9	958	20,5	334	73,6	6,9	
Exp 21	14,94	1,39	10,4	10,3	1241	22,2	341	73,6	5,9	
Exp 25	9,65	1,41	9,2	11,4	2611	22,5	313	77,2	5,5	
Ref invicta	7,14	1,49	9,0	11,6	333	22,2	358	77,2	7,5	
Exp 04	110,74	2,53	14,2	6,6	7182	22,3	286	65,7	9,5	





----- Fin du rapport -----

RAPPORT D'ESSAI
N°1845Vérifié par le
Responsable QualitéApprouvé par le
Directeur du Laboratoire**LABORATOIRE CERIC**
CS 50016
79270 SAINT-SYMPHORIEN
TÉL. 05 49 09 53 92
FAX 05 49 09 50 05
info@laboratoire-ceric.com
www.laboratoire-ceric.com

Demandeur : Lionel DRUETTE

Adresse : Laboratoire CERIC
CS50016
79270 SAINT SYMPHORIEN**Poêle WABI***Mesures de poussière (QUALICOMB)*

Référentiel(s) : /

Rapport rédigé par : Julien LANDREAU
Le : 22/04/2015Rapport validé par : Lionel DRUETTE
Fonction : Directeur du laboratoire CERIC

Date :

Signature :

Seul l'exemplaire du rapport original signé sous forme papier ou une copie certifiée conforme par le laboratoire CERIC fait foi.

Le laboratoire CERIC est le laboratoire première partie de POUJOLAT SA. Ce rapport d'essais atteste uniquement des caractéristiques de l'échantillon soumis aux essais et ne préjuge pas des caractéristiques de produits similaires. Il ne constitue donc pas une certification de produit au sens de l'article L 115-27 du code de la consommation et de la loi du 3 juin 1994. Pour déclarer ou non la conformité à la spécification, il n'a pas été tenu explicitement compte de l'incertitude associée au résultat. La reproduction de ce document n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral.

Contenu

1	Introduction	3
2	Les échantillons.....	4
2.1	Le poêle WABI.....	4
2.2	Les combustibles.....	6
3	Description des essais	7
3.1	Expériences réalisées	7
3.2	Mesures	8
4	Résultats.....	9
	Annexe 1 : Résultats détaillés.....	11

1 Introduction

Dans le cadre du projet ADEME QUALICOMB (convention n° 1301C0049), des essais de combustion sont réalisés sur deux appareils de chauffage au bois domestiques. Ces appareils sont un insert d'ancienne génération et un poêle performant (Flamme Verte 5*). L'objectif de ces essais est d'observer les performances des appareils en fonction de la qualité du combustible utilisé et des pratiques des utilisateurs.

Ce rapport d'essais concerne l'étape n°2 de la tâche 3 du projet QUALICOMB (voir détails).

Un plan d'expérience préalablement établi a permis de définir les 20 essais différents qui ont été réalisés dans le cadre de cette campagne. L'analyse des résultats sera réalisée une fois l'ensemble des résultats réalisés.

La tâche n°3 est décrite par les critères suivants :

Objectifs :	Essais et tests – Mesure des performances des appareils (quatre appareils représentatifs du marché) obtenues avec les combustibles retenus	
Responsable :	LERMAB	
Partenaires :	CERIC, SEGUIN DUTERIEZ, D2I / INVICTA	
Programme détaillé :	1 : Essais Fabricants de foyers (essais normalisés)	SEGUIN DUTERIEZ / CERIC : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 8 essais selon plan d'expériences Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines.
		INVICTA / CERIC : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 8 essais selon plan d'expériences Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines.
	2 : Essais CERIC (conditions réelles)	CERIC : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 20 essais selon plan d'expériences Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines.
		Une réunion suite à cette sous-tâche aura pour objectif de définir les conditions d'essais retenues pour les essais approfondis. Ceci permettra de cibler la suite du projet sur les essais les plus pertinents.
3 : Essais LERMAB (essais approfondis)	LERMAB : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 20 essais Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines, PM10, PM2.5, PM1, HAP, COV.	

Remarques :

- Les résultats obtenus sont donnés sans analyse.
- Le rendement est donné à titre indicatif, il fera l'objet par la suite d'ajustements, suite aux analyses des combustibles (tâche 2). Pour ce rapport, les caractéristiques des combustibles qui ont été utilisées pour le calcul des rendements ont été arbitrairement fixées à :

<u>Caractéristiques du combustible H1</u>		
PCI du combustible	15090	Kj/kg
Humidité du combustible	16	%
Teneur en H du combustible	5	%
Teneur en C du combustible	42	%
Teneur en Cr des résidus	0,09	%

<u>Caractéristiques du combustible H2</u>		
PCI du combustible	12362	Kj/kg
Humidité du combustible	28	%
Teneur en H du combustible	5	%
Teneur en C du combustible	42	%
Teneur en Cr des résidus	0,07	%

2 Les échantillons

2.1 Le poêle WABI

Poêle modèle WABI



Valeurs déclarées :

Puissance = 6 kW

Rendement = 79 %

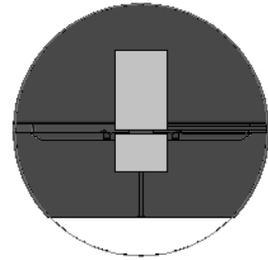
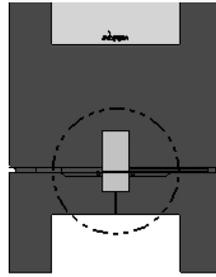
CO (à 13% d'O₂) = 0,05%

Température de fumée = 282°C

Réglages d'air pour le poêle WABI:

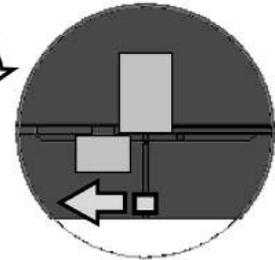
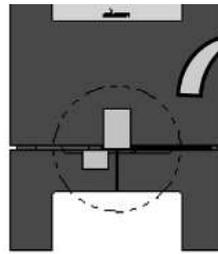
Bonne utilisation (Tirage réglé / à chaud):

Registre centré



Manque d'air (Tirage réglé / à chaud):

Registre à gauche



Bonne utilisation (allumage à froid):

Ouverture 100% pendant 10 min puis

Registre à droite



Manque d'air (allumage à froid): Ouverture 100% pendant 10 min puis

Registre centré

2.2 Les combustibles

Pour ces essais, des bûches de caractéristiques variées sont utilisées :

Paramètres et niveaux :

Essence	G1 – Chêne / Hêtre	G2 – Sapin
Humidité	H1 – 17%	H2 – 28%
Ecorce	Avec	Sans



Exemple : G1-H1- avec écorce



Exemple : G1-H1- sans écorce



Exemple : G2-H1- sans écorce

3 Description des essais

3.1 Expériences réalisées

- Lors de cette campagne, les essais suivants ont été réalisés en condition de tirage stabilisé (12 Pa) :

N° pl exp	Humidité	Calibre	Ecorce	Essence	Utilisation	Masse
Exp 2	H1	1 bûche	Oui	Resineux	Mauvaise	1,40
Exp 3	H2	2 bûches	Non	Resineux	Mauvaise	1,64
Exp 19	H1	2 bûches	Non	Resineux	Bonne	1,40
Exp 23	H1	2 bûches	Oui	Resineux	Bonne	1,40

Le tronçon de mesure est réalisé selon la NF EN 13240. La sonde de prélèvement pour la mesure de poussière est positionnée au centre du conduit, 20 cm en amont de la mesure de gaz.

Particularité du montage : Le poêle posé sur une balance était isolé des conduits et des prises de mesure à l'aide d'un joint à eau.

- Les essais en tirage naturel (démarrage à froid) ont été effectués avec une colonne de 4 m de conduits :

N° pl exp	Humidité	Calibre	Ecorce	Essence	Utilisation	Masse
Exp 6	H1	1 bûche	Non	Resineux	Bonne	1,4
Exp 27	H1	2 bûches	Non	Feuillus	Bonne	1,40
Exp 5	H1	2 bûches	Oui	Feuillus	Mauvaise	1,4
Exp 7	H2	2 bûches	Oui	Resineux	Bonne	1,64
Exp 8	H2	1 bûche	Non	Feuillus	Mauvaise	1,64

Particularité du montage : Le poêle est posé sur le sol, le raccordement au conduit n'est plus réalisé avec un joint à eau mais avec un élément simple paroi.

3.2 Mesures

- Les grandeurs mesurées sont les suivantes :

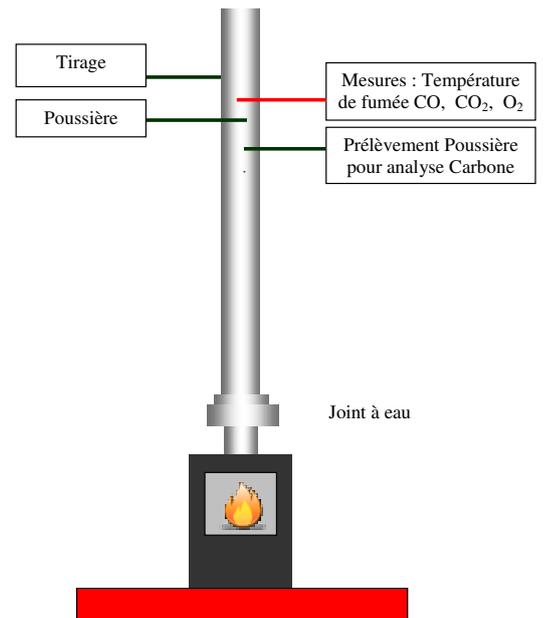
Analyseur de combustion SIEMENS ULTRAMAT 23 :

- CO,
- CO₂,
- O₂,

Centrale d'acquisition FLUKE 2640A :

- Température de fumée,
- Température ambiante,
- Température extérieure,

Ces données sont ensuite utilisées pour le calcul du rendement selon la norme NF EN 13240.

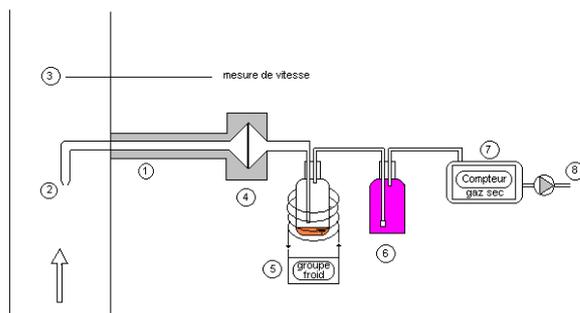


Banc de mesure de poussière sur filtre chauffé (CERIC) :

Note relative à la mesure de poussière sur filtre chauffé :

La concentration de poussières est estimée à l'aide de la méthode NF EN 13284-1. Il s'agit de prélever un volume de fumées compris entre 500 et 600 l pendant une durée de 60 minutes, sur un porte filtre chauffé à 160 °C et avec une buse de prélèvement de diamètre 10 mm.

L'obtention de la concentration provient du résultat de la pesée de filtre avant et après le prélèvement divisé par le volume de gaz prélevé. Les valeurs seront réajustées pour être exprimées en mg /Nm³ et ramenées à 13 % O₂.



4 Résultats

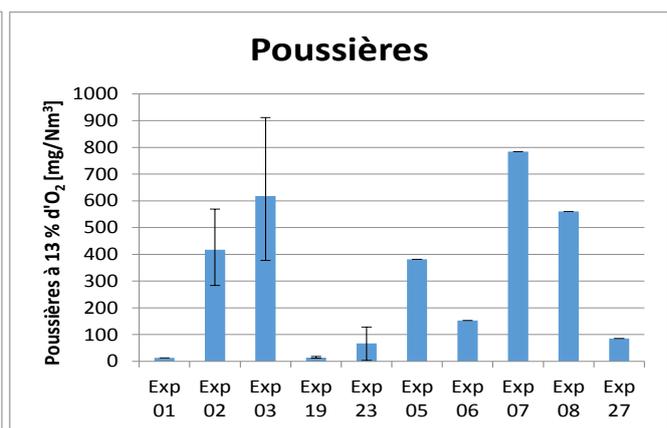
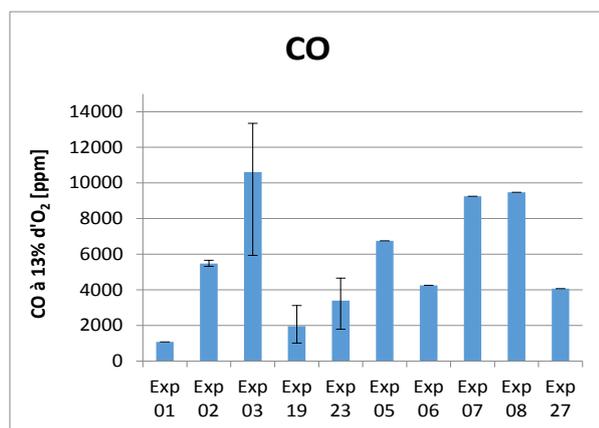
- Essais en tirage stabilisé :**

Intitulé essai	Poussières		Combustion						
	$m_{\text{bois init.}}$ kg	m_{filtre} à 13% O ₂ mg.Nm ⁻³	$T_{\text{tronçon}}$ °C	CO ₂ %	O ₂ %	CO à 13% O ₂ ppm	Tirage Pa	T_{ambiant} °C	η %
Exp 01	1,4	12,9	297,1	10,6	10,5	1076	-12,1	25,3	77,7
Exp 02	1,4	416,9	228,1	7,1	13,7	5473	-14,7	25,3	74,3
Exp 03	2,0	617,7	203,9	6,9	14,1	10605	-12,6	25,2	68,2
Exp 19	1,5	14,2	285,6	10,0	10,9	1962	-12,8	25,6	76,9
Exp 23	1,5	67,0	274,0	8,7	12,1	3392	-13,9	23,6	74,4

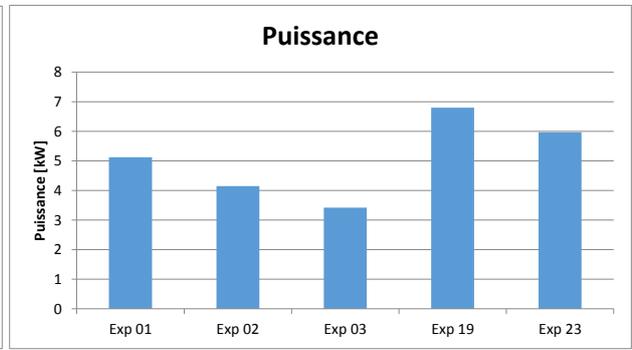
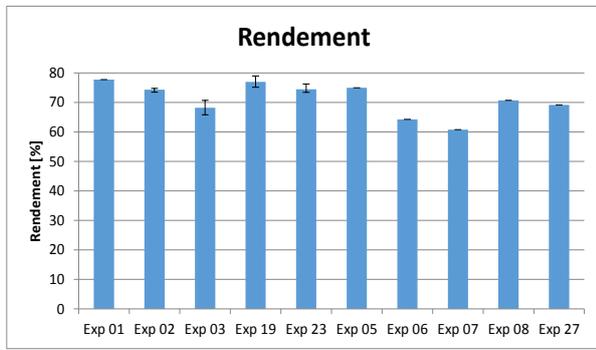
Remarque : L'expérience 01 a été réalisée en complément du plan d'expérience prévu au CERIC pour comparer les résultats obtenus avec ceux mesurés lors des essais INVICTA (RE 1750).

- Essais en tirage naturel / démarrage à froid :**

Intitulé essai	Poussières		Combustion						
	$m_{\text{bois init.}}$ kg	m_{filtre} à 13% O ₂ mg.Nm ⁻³	$T_{\text{tronçon}}$ °C	CO ₂ %	O ₂ %	CO à 13% O ₂ ppm	Tirage Pa	T_{ambiant} °C	η %
Exp 05	1,4	381,6	171,1	5,5	15,2	6744	-9,8	21,5	75,0
Exp 06	1,4	152,3	190,6	3,7	17,0	4253	-12,3	21,9	64,3
Exp 07	1,7	784,2	147,9	3,3	17,5	9257	-12,4	21,1	60,8
Exp 08	1,7	560,6	94,6	3,0	17,7	9480	-5,1	17,9	70,7
Exp 27	1,4	85,5	235,1	5,8	14,9	4063	-11,9	19,9	69,1



Note : CO déclaré = 0,05%



Note : Rendement déclaré = 79%

Puissance déclarée = 6 kW

----- Fin du rapport -----

Annexe 1 : Résultats détaillés

Données	Unité	Données générales																	
		Exp 23	Exp 23	Exp 23	Exp 19	Exp 19	Exp 19	Exp 02	Exp 02	Exp 02	Exp 01	Exp 03	Exp 03	Exp 03	Exp 27	Exp 06	Exp 05	Exp 07	Exp 08
Intitulé de l'essai	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	15	16	17	18	19
N° de l'essai	-	F27	F28	F29	F30	F01	F02	F03	F04	F05	F06	F07	F08	F09	F11	F12	F13	F14	F15
N° du filtre	-	23/02/15	24/02/15	24/02/15	24/02/15	24/02/15	24/02/15	24/02/15	24/02/15	24/02/15	25/02/15	25/02/15	25/02/15	25/02/15	03/03/15	03/03/15	03/03/15	03/03/15	04/03/15
Date de prélèvement	jj/mm/aa	15:42:57	09:29:11	10:15:51	10:01:14	11:43:53	12:33:18	13:17:10	14:30:18	15:46:25	10:01:29	10:52:19	13:04:30	14:16:47	10:23:37	11:42:20	13:41:54	15:25:34	10:06:21
Début de prélèvement	hh:mm:ss	16:27:57	10:07:11	10:50:51	10:36:14	12:23:53	13:08:18	14:07:10	15:20:18	16:36:25	10:41:29	11:52:19	13:59:30	15:16:47	11:13:37	12:34:20	14:31:54	16:15:34	10:51:21
Fin de prélèvement	hh:mm:ss	00:45:00	38:00	35:00	35:00	40:00	35:00	50:00	50:00	50:00	40:00	00:00	55:00	00:00	50:00	52:00	50:00	50:00	45:00
Durée de prélèvement	min	Conditions ambiantes																	
Pression atmosphérique	hPa	1006	1016	1017	1017	1017	1017	1018	1018	1018	1021	1021	1021	1021	1025	1025	1024	1024	1034
Température ambiante	°C	24,6	22,2	24,1	23,7	26,2	26,9	26,4	24,9	24,5	25,3	24,9	25,2	25,4	19,9	21,9	21,5	21,1	17,9
Au niveau de l'appareil																			
Consommation réelle	kg	1,22	1,30	1,30	1,42	1,41	1,16	0,87	1,41	1,15	1,08	1,50	1,49	1,25	---	---	---	---	---
Durée de l'essai	min	45	38	35	35	40	35	50	50	50	40	60	55	60	50	52	50	50	60
Débit massique de bois	kg.h ⁻¹	1,63	2,05	2,23	2,43	2,12	1,99	1,05	1,69	1,38	1,62	1,50	1,62	1,25	---	---	---	---	---
Température buse	°C	263,4	284,7	274,0	263,5	289,4	304,0	219,1	225,4	240,0	297,1	193,6	219,2	198,9	235,1	190,6	171,1	147,9	94,6
Température air comburant	°C	24,6	22,2	24,1	23,7	26,2	26,9	26,4	24,9	24,5	25,3	24,9	25,2	25,4	19,9	21,9	21,5	21,1	17,9
Tirage	Pa	-14,5	-14,4	-12,7	-13,1	-13,2	-12,0	-14,5	-14,2	-15,4	-12,1	-13,9	-11,9	-11,8	-11,9	-12,3	-9,8	-12,4	-5,1
Puissance	kW	4,9	6,1	6,9	7,4	6,6	6,40	3,18	5,14	4,13	5,12	3,65	3,79	2,83	---	---	---	---	---
Chaleur spécifique fumée	kJ/K.m	1,31	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,31	1,31	1,31	1,32	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,30
Chaleur sp. vapeur d'eau	kJ/K.m	1,53	1,54	1,54	1,53	1,54	1,54	1,53	1,53	1,53	1,54	1,52	1,53	1,52	1,53	1,52	1,52	1,51	1,50
Pertes sensibles - q _a	%	22,10	23,00	21,79	21,83	21,14	19,70	20,25	20,37	21,89	20,91	22,90	20,72	22,85	27,03	31,59	19,07	30,10	19,76
Pertes latentes - q _b	%	3,83	3,08	1,47	2,54	1,70	0,83	4,51	4,39	4,17	0,87	5,89	10,66	10,88	3,36	3,64	5,46	8,63	9,03
Pertes imbrûlés - q _r	%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Rendement	%	73,6	73,4	76,2	75,1	76,7	79,0	74,7	74,7	73,4	77,7	70,7	68,1	65,8	69,1	64,3	75,0	60,8	70,7
Débit calorifique	kW	6,6	8,3	9,1	9,9	8,6	8,1	4,3	6,9	5,6	6,6	5,2	5,6	4,3	---	---	---	---	---
Au niveau du point de prélèvement																			
Temp. des fumées tronçon	°C	263,4	284,7	274,0	263,5	289,4	304,0	219,1	225,4	240,0	297,1	193,6	219,2	198,9	235,1	190,6	171,1	147,9	94,6
Teneur en CO ₂ sur sec	%	8,1	8,8	9,0	8,5	9,9	11,7	6,9	7,2	7,2	10,6	6,5	8,0	6,3	5,8	3,7	5,5	3,3	3,0
Teneur en O ₂ sur sec	%	12,4	12,1	11,9	12,4	11,0	9,3	13,6	13,8	13,7	10,5	14,1	13,2	15,1	14,9	17,0	15,2	17,5	17,7
Teneur en CO ppm	ppm	4977	4265	2044	3358	2615	1476	5044	5109	4852	1409	5148	12371	9847	3075	2151	4902	4042	3866
Teneur en CO ppm à 13 % O ₂	ppm	4651	3825	1790	3116	2083	1009	5447	5657	5318	1076	5934	12687	13345	4063	4253	6744	9257	9480
Teneur en CO %	%	0,50	0,43	0,20	0,34	0,26	0,15	0,50	0,51	0,49	0,14	0,51	1,24	0,98	0,31	0,22	0,49	0,40	0,39
Au niveau du filtre																			
Indice pondéral sur sec	mg.m ⁻³	68,0	134,7	3,9	12,7	21,0	16,4	489,8	335,0	241,1	15,9	457,5	343,8	625,2	60,9	71,5	259,5	316,4	215,1
Indice pondéral sur sec	mg.Nm ⁻³	73,6	143,4	4,2	13,6	22,5	17,6	526,2	359,1	258,5	17,0	489,2	367,3	669,3	64,5	76,1	276,1	336,8	224,4
Indice pondéral à 13% O ₂	mg.Nm ⁻³	68,8	128,4	3,7	12,6	17,9	12,0	568,9	398,2	283,6	12,9	565,0	376,8	911,2	85,5	152,3	381,6	784,2	560,6

RAPPORT D'ESSAI N°1846

Vérifié par le
Responsable Qualité

Approuvé par le
Directeur du Laboratoire



LABORATOIRE CERIC
CS 50016
79270 SAINT-SYMPHORIEN
TÉL. 05 49 09 53 92
FAX 05 49 09 50 05
info@laboratoire-ceric.com
www.laboratoire-ceric.com



Demandeur : Lionel DRUETTE

Adresse : Laboratoire CERIC
CS50016
79270 SAINT SYMPHORIEN

Foyer SUNFLAM

Mesures de poussière (QUALICOMB)

Référentiel(s) : /

Rapport rédigé par : Julien LANDREAU
Le : 22/04/2015

Rapport validé par : Lionel DRUETTE
Fonction : Directeur du laboratoire CERIC

Date :
Signature :

Seul l'exemplaire du rapport original signé sous forme papier ou une copie certifiée conforme par le laboratoire CERIC fait foi.

Le laboratoire CERIC est le laboratoire première partie de POUJOLAT SA. Ce rapport d'essais atteste uniquement des caractéristiques de l'échantillon soumis aux essais et ne préjuge pas des caractéristiques de produits similaires. Il ne constitue donc pas une certification de produit au sens de l'article L 115-27 du code de la consommation et de la loi du 3 juin 1994. Pour déclarer ou non la conformité à la spécification, il n'a pas été tenu explicitement compte de l'incertitude associée au résultat. La reproduction de ce document n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral.

Contenu

1	Introduction	3
2	Les échantillons.....	4
2.1	Le foyer SUNFLAM	4
2.2	Les combustibles.....	5
3	Description des essais	6
3.1	Expériences réalisées	6
3.2	Mesures	7
4	Résultats.....	8
	Annexe 1 : Résultats détaillés.....	10

1 Introduction

Dans le cadre du projet ADEME QUALICOMB (convention n° 1301C0049), des essais de combustion sont réalisés sur deux appareils de chauffage au bois domestiques. Ces appareils sont un insert d'ancienne génération et un poêle performant (Flamme Verte 5*). L'objectif de ces essais est d'observer les performances des appareils en fonction de la qualité du combustible utilisé et des pratiques des utilisateurs.

Ce rapport d'essais concerne l'étape n°2 de la tâche 3 du projet QUALICOMB (voir détails).

Un plan d'expérience préalablement établi a permis de définir les 20 essais différents qui ont été réalisés dans le cadre de cette campagne. L'analyse des résultats sera réalisée une fois l'ensemble des résultats réalisés.

La tâche n°3 est décrite par les critères suivants :

Objectifs :	Essais et tests – Mesure des performances des appareils (quatre appareils représentatifs du marché) obtenues avec les combustibles retenus	
Responsable :	LERMAB	
Partenaires :	CERIC, SEGUIN DUTERIEZ, D2I / INVICTA	
Programme détaillé :	1 : Essais Fabricants de foyers (essais normalisés)	SEGUIN DUTERIEZ / CERIC : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 8 essais selon plan d'expériences Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines.
		INVICTA / CERIC : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 8 essais selon plan d'expériences Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines.
	2 : Essais CERIC (conditions réelles)	CERIC : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 20 essais selon plan d'expériences Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines.
		Une réunion suite à cette sous-tâche aura pour objectif de définir les conditions d'essais retenues pour les essais approfondis. Ceci permettra de cibler la suite du projet sur les essais les plus pertinents.
3 : Essais LERMAB (essais approfondis)	LERMAB : 2 appareils (1 insert ancien et un poêle Flamme Verte 5*) / 20 essais Rendement, puissance, Carbone élémentaire / organique, CO, CO2, O2, NOx, particules fines, PM10, PM2.5, PM1, HAP, COV.	

Remarques :

- Les résultats obtenus sont donnés sans analyse.
- Le rendement est donné à titre indicatif, il fera l'objet par la suite d'ajustements, suite aux analyses des combustibles (tâche 2). Pour ce rapport, les caractéristiques des combustibles qui ont été utilisées pour le calcul des rendements ont été arbitrairement fixées à :

<u>Caractéristiques du combustible H1</u>		
PCI du combustible	15090	Kj/kg
Humidité du combustible	16	%
Teneur en H du combustible	5	%
Teneur en C du combustible	42	%
Teneur en Cr des résidus	0,09	%

<u>Caractéristiques du combustible H2</u>		
PCI du combustible	12362	Kj/kg
Humidité du combustible	28	%
Teneur en H du combustible	5	%
Teneur en C du combustible	42	%
Teneur en Cr des résidus	0,07	%

2 Les échantillons

2.1 Le foyer SUNFLAM

Foyer modèle SUNFLAM



Puissance = 12 KW

Rendement = 73,2 %

CO (à 13% d'O₂) = 0,25%

Température de fumée = 302°C

Réglages d'air pour l'insert SUNFLAM:

Bonne utilisation (à chaud):

Ouverture 25% (20 mm)

Manque d'air (à chaud):

Ouverture 0%



Bonne utilisation (allumage à froid): Ouverture 100% pendant 10 min puis

Ouverture (50 mm)

Manque d'air (allumage à froid): Ouverture 100% pendant 10 min puis

Ouverture 0%

2.2 Les combustibles

Pour ces essais, des bûches de caractéristiques variées sont utilisées :

Paramètres et niveaux :

Essence	G1 – Chêne / Hêtre	G2 – Sapin
Humidité	H1 – 17%	H2 – 28%
Ecorce	Avec	Sans



Exemple : G1-H1- avec écorce



Exemple : G1-H1- sans écorce



Exemple : G2-H1- sans écorce

3 Description des essais

3.1 Expériences réalisées

- Lors de cette campagne, les essais suivants ont été réalisés en condition de tirage stabilisé (12 Pa) :

N° pl exp	Humidité	Calibre	Ecorce	Essence	Utilisation	Masse
Exp 10	H1	1 bûche	Oui	Résineux	Bonne	4,10
Exp 11	H2	2 bûches	Non	Résineux	Bonne	4,73
Exp 12	H2	1 bûche	Oui	Feuillus	Mauvaise	4,73
Exp 22	H1	2 bûches	Oui	Feuillus	Bonne	4,10
Exp 24	H1	2 bûches	Oui	Résineux	Bonne	4,10

Le tronçon de mesure est réalisé selon la NF EN 13229. La sonde de prélèvement pour la mesure de poussière est positionnée au centre du conduit, 20 cm en amont de la mesure de gaz.

Particularité du montage : l'insert posé sur une balance était isolé des conduits et des prises de mesure à l'aide d'un joint à eau.

- Les essais en tirage naturel (démarrage à froid) ont été effectués avec une colonne de 4 m de conduits :

N° pl exp	Humidité	Calibre	Ecorce	Essence	Utilisation	Masse
Exp 13	H1	2 bûches	Oui	Feuillus	Bonne	4,10
Exp 14	H1	1 bûche	Non	Résineux	Mauvaise	4,10
Exp 15	H2	2 bûches	Oui	Résineux	Mauvaise	4,73
Exp 16	H2	1 bûche	Non	Feuillus	Bonne	4,73
Exp 18	H2	1 bûche	Oui	Résineux	Mauvaise	4,73
Exp 28	H1	2 bûches	Non	Feuillus	Bonne	4,1

Particularité du montage : l'insert est posé sur le sol, le raccordement au conduit n'est plus réalisé avec un joint à eau mais avec un élément simple paroi.

3.2 Mesures

- Les grandeurs mesurées sont les suivantes :

Analyseur de combustion SIEMENS ULTRAMAT

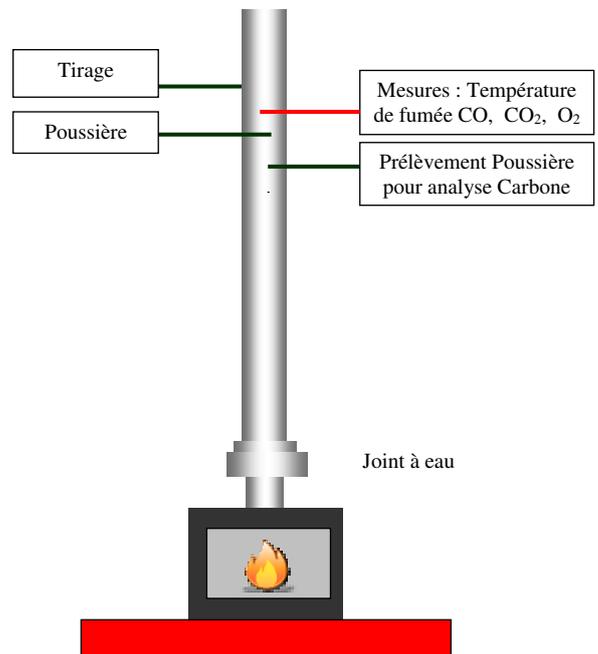
23 :

- CO,
- CO₂,
- O₂,

Centrale d'acquisition FLUKE 2640A :

- Température de fumée,
- Température ambiante,
- Température extérieure,

Ces données sont ensuite utilisées pour le calcul du rendement selon la norme NF EN 13229.

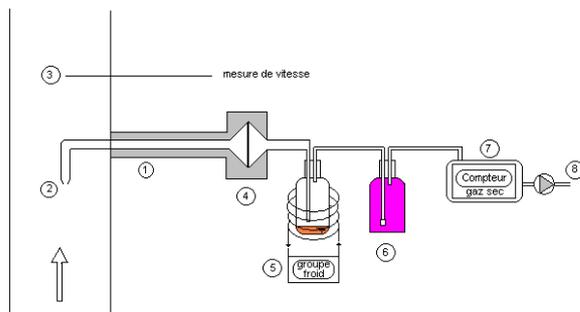


Banc de mesure de poussière sur filtre chauffé (CERIC) :

Note relative à la mesure de poussière sur filtre chauffé :

La concentration de poussières est estimée à l'aide de la méthode NF EN 13284-1. Il s'agit de prélever un volume de fumées compris entre 500 et 600 l pendant une durée de 60 minutes, sur un porte filtre chauffé à 160 °C et avec une buse de prélèvement de diamètre 10 mm.

L'obtention de la concentration provient du résultat de la pesée de filtre avant et après le prélèvement divisé par le volume de gaz prélevé. Les valeurs seront réajustées pour être exprimées en mg /Nm³ et ramenées à 13 % O₂.



4 Résultats

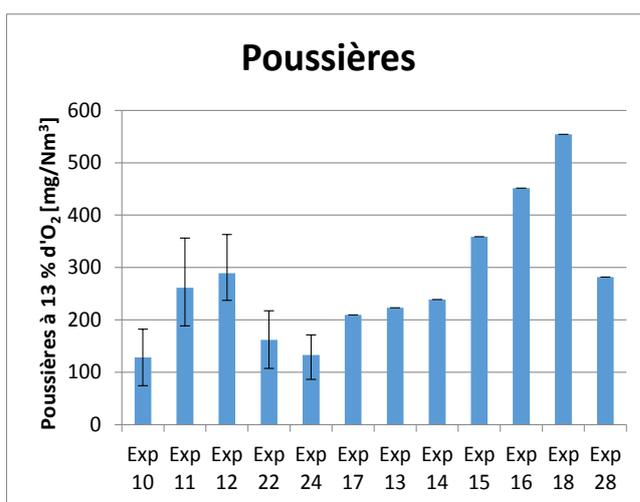
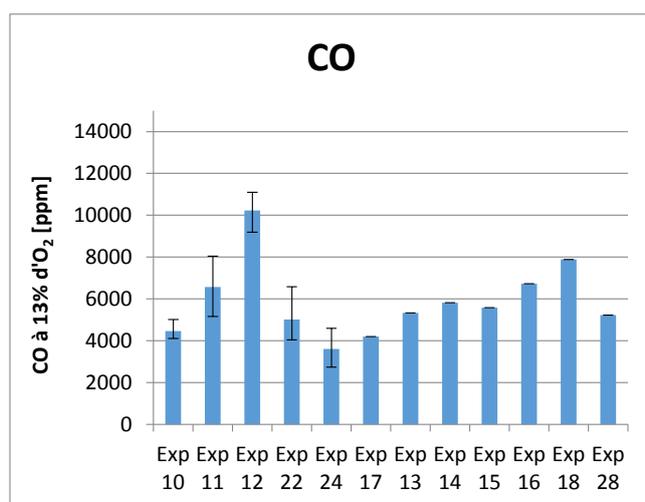
- Essais en tirage stabilisé :

Intitulé essai	Poussières		Combustion						
	$m_{\text{bois init.}}$ kg	m_{filtre} à 13% O ₂ mg.Nm ⁻³	T _{tronçon} °C	CO ₂ %	O ₂ %	CO à 13% O ₂ ppm	Tirage Pa	T _{ambiant} °C	η %
Exp 10	4,6	128,2	262,5	5,6	15,8	4454	-12,1	23,7	64,9
Exp 11	5,2	261,1	265,7	5,0	15,6	6569	-11,9	27,9	52,2
Exp 12	5,2	289,2	163,6	2,4	18,5	10230	-11,9	23,7	44,6
Exp 22	4,5	162,0	295,0	6,5	15,0	5017	-12,1	28,7	65,9
Exp 24	4,5	133,1	295,0	6,5	14,5	3599	-12,1	23,4	65,7
Exp 17	4,5	209,6	266,1	6,3	14,5	4193	-12,0	26,5	68,4

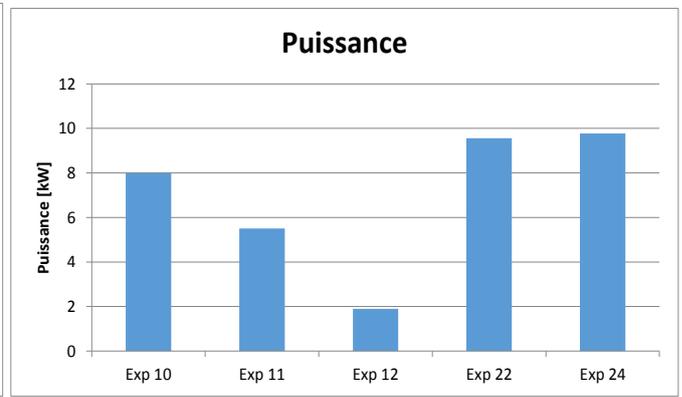
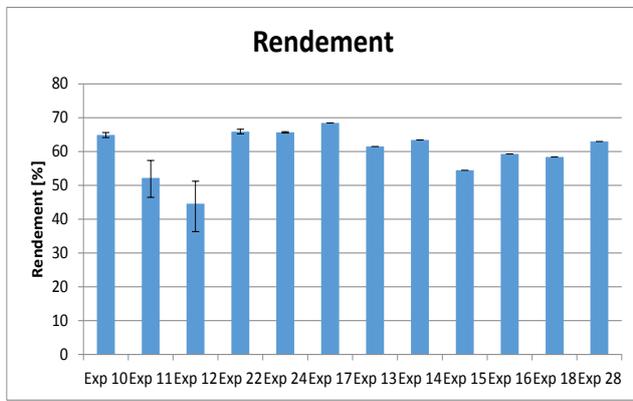
Remarque : L'expérience 17 a été réalisée en complément du plan d'expérience prévu au CERIC pour comparer les résultats obtenus avec ceux mesurés lors des essais SEGUIN (RE 1733).

- Essais en tirage naturel / démarrage à froid :

Intitulé essai	Poussières		Combustion						
	$m_{\text{bois init.}}$ kg	m_{filtre} à 13% O ₂ mg.Nm ⁻³	T _{tronçon} °C	CO ₂ %	O ₂ %	CO à 13% O ₂ ppm	Tirage Pa	T _{ambiant} °C	η %
Exp 13	4,1	223,2	202,3	3,8	17,2	5322	-11,8	16,8	61,4
Exp 14	4,1	238,6	177,6	3,4	17,2	5813	-14,2	19,1	63,4
Exp 15	4,6	358,7	173,6	3,2	17,5	5578	-10,3	22,3	54,4
Exp 16	4,7	451,4	128,6	2,6	18,2	6727	-10,4	17,7	59,3
Exp 18	4,7	554,4	103,7	2,0	18,8	7879	-8,9	20,1	58,4
Exp 28	4,1	281,6	200,2	3,9	16,9	5219	-12,2	19,9	62,9



Note : CO déclaré = 0,25%



Note : Rendement déclaré = 73,2%

Puissance déclarée = 12 kW

----- Fin du rapport -----

Annexe 1 : Résultats détaillés

Données	Unité	Données générales																				
		Exp 24	Exp 24	Exp 24	Exp 10	Exp 10	Exp 22	Exp 22	Exp 22	Exp 11	Exp 11	Exp 11	Exp 12	Exp 12	Exp 12	Exp 17	Exp 14	Exp 13	Exp 28	Exp 15	Exp 16	Exp 18
Intitulé de l'essai	-	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	19	20	21	22	23	24
N° de l'essai	-	F01	F02	F05	F06	F08	F09	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F21	F22	F23	F24	F03	F04
N° du filtre	-	27/01/15	27/01/15	27/01/15	27/01/15	28/01/15	28/01/15	28/01/15	28/01/15	28/01/15	29/01/15	29/01/15	29/01/15	29/01/15	29/01/15	29/01/15	10/02/15	11/02/15	11/02/15	11/02/15	12/02/15	12/02/15
Date de prélèvement	jj/mm/aa	11:36:15	12:59:20	14:12:34	15:24:58	09:56:20	11:26:14	12:35:46	13:48:53	15:19:09	08:03:00	09:32:42	11:01:51	12:22:10	13:31:47	14:45:41	16:01:32	09:24:37	13:44:39	15:24:21	09:02:12	10:42:11
Début de prélèvement	hh:mm:ss	12:36:15	13:59:20	15:12:34	16:24:58	10:56:20	12:26:14	13:35:46	14:48:53	16:19:09	09:03:00	10:32:42	12:01:51	13:22:10	14:31:47	15:45:41	17:01:32	10:24:37	14:44:39	16:24:21	10:02:12	11:42:11
Fin de prélèvement	hh:mm:ss	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00	01:00:00
Durée de prélèvement	min																					
Conditions ambiantes																						
Pression atmosphérique	hPa	1032	1032	1031	1031	1023	1021	1019	1017	1016	1006	1003	1001	998	991	990	1025	1023	1022	1021	1021	1021
Température ambiante	°C	27,1	23,2	19,9	20,8	26,6	28,4	28,9	29,0	30,4	26,8	26,5	23,4	24,1	23,5	26,5	19,1	16,8	19,9	22,3	17,7	20,1
Au niveau de l'appareil																						
Consommation réelle	kg	3,64	3,67	3,67	2,74	3,32	3,82	3,16	3,72	3,27	3,26	2,61	0,95	1,19	1,49	3,69	---	---	---	---	---	---
Durée de l'essai	min	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Débit massique de bois	kg.h ⁻¹	3,64	3,67	3,67	2,74	3,32	3,82	3,16	3,72	3,27	3,26	2,61	0,95	1,19	1,49	3,69	---	---	---	---	---	---
Température buse	°C	330,1	264,2	290,8	219,9	305,2	307,7	265,1	312,3	281,2	273,0	243,0	180,5	150,1	160,1	266,1	177,6	202,3	200,2	173,6	128,6	103,7
Température air comburant	°C	27,1	23,2	19,9	20,8	26,6	28,4	28,9	29,0	30,4	26,8	26,5	23,4	24,1	23,5	26,5	19,1	16,8	19,9	22,3	17,7	20,1
Tirage	Pa	-12,1	-12,0	-12,0	-12,0	-12,2	-12,1	-12,0	-12,0	-12,0	-11,9	-11,9	-12,0	-11,9	-11,9	-12,0	-14,2	-11,8	-12,2	-10,3	-10,4	-8,9
Puissance	kW	9,7	9,8	9,8	7,1	8,85	10,23	8,38	10,07	5,92	6,42	4,16	1,19	1,88	2,62	10,27	---	---	---	---	---	---
Pertes sensibles - q _a	%	31,75	29,93	31,13	31,78	30,84	30,73	29,76	29,39	40,35	36,43	45,42	52,95	44,71	38,68	27,70	31,16	33,85	32,24	39,38	33,62	33,14
Pertes latentes - q _b	%	2,26	3,70	2,76	3,60	3,05	2,90	4,53	3,56	6,40	5,73	7,62	10,22	8,62	9,61	3,37	4,92	4,20	4,34	5,68	6,57	7,99
Pertes imbrûlés - q _r	%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Rendement	%	65,5	65,9	65,6	64,1	65,6	65,9	65,2	66,5	52,8	57,3	46,5	36,3	46,2	51,2	68,4	63,4	61,4	62,9	54,4	59,3	58,4
Débit calorifique	kW	14,8	14,9	14,9	11,1	13,5	15,5	12,8	15,1	11,2	11,2	9,0	3,3	4,1	5,1	15,0	---	---	---	---	---	---
Au niveau du filtre																						
Indice pondéral sur sec	mg.m ⁻³	76,0	120,6	102,6	86,9	54,4	153,7	93,5	84,4	137,1	152,3	163,7	62,6	67,5	115,5	152,4	106,1	101,0	135,8	143,1	147,4	140,2
Indice pondéral sur sec	mg.Nm ⁻³	80,4	127,4	107,1	90,8	58,2	165,7	101,0	91,5	149,0	166,2	179,3	68,4	74,2	127,9	169,0	111,7	105,7	143,6	152,5	155,2	147,7
Indice pondéral à 13% O ₂	mg.Nm ⁻³	86,3	171,2	141,7	182,3	74,1	217,1	161,8	107,1	238,4	188,7	356,1	237,1	267,4	363,1	209,6	238,6	223,2	281,6	358,7	451,4	554,4