

PERFORMANCES REELLES DE POELES A GRANULES

Campagnes de mesure in situ
des performances énergétiques
et environnementales

RAPPORT FINAL

EXPERTISES

Juillet
2022

REMERCIEMENTS

Comité de suivi

Manon VITEL (Ademe), Florence PROHARAM (Ademe), Isabelle AUGEVEN-BOUR (Ademe)

Contrôle Qualité

Rédaction : Céline LABOUBEE (Solagro), Céline LE DREFF (CSTB), Brice GUENEGO (Wigwam Conseil),
Claire ROUSSEY (Wigwam Conseil), Serge COLLET (Ineris)

Vérification : Isaline FRABOULET (Ineris)

Approbation : Céline BOUDET (Ineris)

CITATION DE CE RAPPORT

Serge COLLET (Ineris), Céline LE DREFF (CSTB), Brice GUENEGO (Wigwam Conseil), Claire ROUSSEY (Wigwam Conseil), Céline LABOUBEE (Solagro), 2022. PERFORMANCES REELLES DE POELES A GRANULES. 69 pages.

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 le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro du marché : 19MAR000886

Référence INERIS : Ineris-MIV-22-200415-02085A

Étude réalisée par INERIS, CSTB, SOLAGRO et WIGWAM Conseil

Suivi de l'exécution du marché - INERIS : Serge COLLET - Direction Milieux et impacts sur le vivant – Unité Caractérisation des émissions atmosphériques et aqueuses

Suivi de l'exécution du marché - ADEME : Manon VITEL – Service Chaleur renouvelable

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| 1. CONTEXTE..... | 7 |
| 1.1. Contexte général | 7 |
| 1.2. Positionnement de l'étude | 8 |
| 1.3. Objectifs de l'étude | 8 |
| 1.4. Partenaires | 9 |
| 2. SELECTION DES SITES..... | 10 |
| 2.1. Critères de sélection des sites suivis | 10 |
| 2.2. Echantillon de vingt sites retenus | 11 |
| 2.3. Evaluation de la conformité des installations | 13 |
| 2.4. Coûts d'investissement et d'exploitation | 14 |
| 3. ANALYSE DES GRANULES UTILISES | 15 |
| 4. CAMPAGNES DE MESURES DES PERFORMANCES ENERGETIQUES DES POELES : MESURES EN CONTINU..... | 16 |
| 4.1. Méthodologie des mesures réalisées en continu sur une saison de chauffe | 16 |
| 4.1.1. Grandeurs mesurées durant la saison de chauffe | 16 |
| 4.1.2. Grandeurs calculées | 16 |
| 4.1.3. Grandeurs complémentaires évaluées | 17 |
| 4.1.4. Définition des journées types | 17 |
| 4.2. Protocoles d'intervention appliqués aux sites | 17 |
| 4.2.1. Identification des différents cas d'intervention | 17 |
| 4.2.2. Cas A : Avec mesure du tirage, absence d'énergie tiers de chauffage | 18 |
| 4.2.3. Cas B : Sans mesure du tirage, absence d'énergie tiers chauffage | 18 |
| 4.2.4. Cas C : Avec mesure du tirage, impossibilité de mesurer l'énergie tiers de chauffage..... | 18 |
| 4.2.5. Cas D : Sans mesure du tirage, impossibilité de mesurer l'énergie tiers de chauffage..... | 18 |
| 4.3. Difficultés rencontrées lors du déploiement de l'instrumentation et de son suivi | 20 |
| 4.3.1. Mise en place de l'instrumentation..... | 20 |
| 4.3.1.1. Aléas techniques et méthodologie de réception des données | 20 |
| 4.3.1.2. Suivi continu de l'instrumentation..... | 20 |
| 4.4. Résultats métrologiques du suivi continu sur une saison de chauffe | 20 |
| 4.4.1. Ensemble de la période de chauffe | 20 |
| 4.4.1.1. Informations préliminaires..... | 20 |
| 4.4.1.2. Synthèse des résultats | 23 |
| 4.4.2. Sur la journée la plus froide et les journées typiques | 29 |
| 5. CAMPAGNE DE MESURES DES EMISSIONS DE POLLUANTS : MESURES PONCTUELLES..... | 33 |
| 5.1. Difficultés rencontrées..... | 33 |
| 5.2. Déroulement des essais | 34 |
| 5.3. Protocoles de test utilisés | 34 |

| | |
|---|-----------|
| 5.4. Mesures effectuées | 35 |
| 5.5. Expression des résultats de mesures | 36 |
| 5.6. Récapitulatif des paramètres déterminés lors des essais ponctuels | 36 |
| 5.7. Résultats des mesures à l'émission | 36 |
| 5.7.1. Informations préliminaires..... | 36 |
| 5.7.2. Conformité des installations | 37 |
| 5.7.3. Phases de combustion et émissions de polluants..... | 37 |
| 5.7.4. Modes de fonctionnement..... | 39 |
| 5.7.5. Origine des polluants et paramètres influents..... | 40 |
| 5.7.5.1. Emissions de CO..... | 40 |
| 5.7.5.2. Emissions de NO _x | 41 |
| 5.7.5.3. Emissions de PM | 41 |
| 5.7.6. Résultats globaux..... | 42 |
| 5.7.7. Comparaison essais normatifs versus essais in situ..... | 43 |
| 5.7.8. Ecart de performances au sein d'un même modèle de poêle..... | 45 |
| 5.7.9. Impact des différentes allures ou de la puissance installée sur les émissions | 45 |
| 5.7.10. Comparaison des protocoles BeReal - conditions réelles simulées..... | 47 |
| 5.7.11. Impact du refroidissement du poêle sur les émissions de polluants lors de l'allumage | 50 |
| 5.7.12. Comparaison des deux combustibles | 50 |
| 5.7.13. Comparaison des résultats à ceux de la littérature | 52 |
| 5.7.14. Estimation des flux émis durant l'ensemble d'une saison de chauffe | 54 |
| 6. CALCUL DE DIMENSIONNEMENT DES CONDUITS | 56 |
| 6.1. Présentation des calculs de dimensionnement de conduit | 56 |
| 6.2. Méthodologie appliquée & Hypothèses de calcul..... | 57 |
| 6.3. Résultats obtenus & Analyse | 59 |
| 6.4. Limites des calculs de dimensionnement des conduits d'une façon générale | 61 |
| 7. CONCLUSIONS | 63 |

RÉSUMÉ

Les ventes de poêles à granulés ont beaucoup augmenté ces dernières années. Ces appareils font partie des systèmes de chauffage à énergies renouvelables ayant de hautes performances énergétiques et environnementales d'après les tests menés en laboratoire selon les protocoles normatifs. Cependant, les performances énergétiques réelles et les émissions de polluants atmosphériques liées à l'utilisation de ces appareils ont été peu étudiées *in situ* jusqu'à présent. Des campagnes de mesures ont été menées chez vingt particuliers disposant de ce type d'appareils, avec les mêmes granulés, à d'autres allures et dans d'autres conditions que celles étudiées selon les normes en vigueur. Les résultats de ces campagnes ont permis de caractériser les performances énergétiques et environnementales des installations étudiées : consommations, rendements énergétiques, émissions de polluants (monoxyde de carbone, particules fines solides et oxydes d'azote). Les installations concernent des appareils récents, de moins de 5 ans, labellisés Flamme Verte 7*, de 8 kW environ, utilisés en chauffage principal et sont situées dans différentes régions climatiques métropolitaines. Les mesures énergétiques ont été effectuées en continu durant l'ensemble d'une saison de chauffe. Les mesures d'émissions de polluants ont été réalisées sur une période de deux jours.

Les mesures de performances énergétiques font apparaître des durées de fonctionnement du poêle à granulés, ainsi que des puissances et taux de charge de l'appareil, très variables d'un site à l'autre (avec un facteur de 1 à 7 sur la durée et de 1 à 4 sur la puissance et le taux de charge). La consommation électrique des poêles à granulés de l'échantillon retenu augmente de façon linéaire avec la durée de fonctionnement de l'appareil, ainsi qu'avec la température des fumées. La température de consigne du poêle à granulés semble globalement bien respectée dans le salon pour la majorité des sites, même s'il est généralement constaté un léger excès de température de 1 °C en moyenne.

Les mesures à l'émission des appareils ont été effectuées selon deux protocoles : (1) BeReal et (2) dans des conditions réelles simulées (selon deux modes de fonctionnement des appareils : modulation et marche/arrêt), sur une période de deux jours environ sur chaque site :

- Pour plus des deux tiers des appareils testés, les niveaux d'émission de polluants mesurés sont faibles avec des facteurs d'émission en énergie entrante inférieurs à 630 g/GJ en monoxyde de carbone (CO) et à 25 g/GJ en particules solides, quelle que soit l'allure de fonctionnement des appareils. Les rendements énergétiques sont élevés, de l'ordre de 85 %.
- Les autres appareils disposent de performances aussi élevées à des allures soutenues (plus de 40 % de la puissance nominale) mais bien plus faibles à allures plus réduites (facteurs d'émission en CO compris entre 1000 et 1800 g/GJ, rendements inférieurs à 80 %). Ces allures réduites sont utilisées notamment lorsque les poêles modulent ou lorsque ces derniers sont surdimensionnés par rapport aux besoins de chauffage du logement. Ces baisses de performances sont liées à des débits d'air comburant inadaptés à la charge de combustible introduite (excès d'air élevé), provenant de mauvais réglages de l'appareil et/ou d'un dimensionnement des conduits (amenée d'air, conduit de raccordement, conduit de fumée) inapproprié (ou non réalisé).

L'ensemble des résultats est, par ailleurs, plus élevé pour les émissions de polluants (en moyenne + 450 % pour le CO et + 30 % pour les PM) et plus faible pour le rendement (- 4,8 points en moyenne) que les performances annoncées par les constructeurs, obtenues en régime établi, pour des conditions optimales normalisées.

Des recommandations à destination des différents acteurs de la filière (fabricants d'appareils, installateurs, utilisateurs, rédacteurs des normes) ont été rédigées (cf. Rapport de recommandations). Elles visent à mieux prendre en compte l'usage réel des appareils pour s'assurer que le dimensionnement des conduits, le dimensionnement des appareils et leurs réglages soient bien optimisés vis-à-vis de la combustion.

En conclusion, les performances intrinsèques des poêles à granulés sont élevées mais leur fonctionnement en conditions réelles reste perfectible, en particulier en ajustant la puissance de l'appareil au besoin en chauffage du logement et en adaptant le dimensionnement des conduits.

ABSTRACT

Sales of pellet stoves have increased significantly over the past few years. These devices are part of the renewable energy heating systems with high performance according to the tests carried out in laboratory with standard protocols. However, the actual in situ performance and impact on air quality of these devices have been little studied so far.

Measurement campaigns were carried out at twenty private home equipped with this type of device, with the same pellets, at different load rate and under other conditions than those studied according to the standards in force. The results of these campaigns made it possible to characterize energy and environmental performances of sites studied: consumption, energy efficiency and pollutant emissions (carbon monoxide, solid particles and nitrogen oxides). These sites concern recent device, less than 5 years old, labeled Flamme verte 7*, of around 8 kW, used for main heating, located in different metropolitan climatic regions. The energy measurements were carried out continuously throughout the heating season. Pollutant emission measurements were taken over a two-day period.

Energy performance measurements show that operating times of the pellet stove, as well as the powers and load rates of the device, vary greatly from one site to another (with a factor of 1 to 7 over the duration and from 1 to 4 on power and load rate). Electrical consumption of the pellet stoves in the selected sample increases linearly with the duration of operating times of the device, as well as with the temperature of the fumes. The pellet stove's setpoint temperature seems generally well respected in the living room for the majority of sites, even if a slight excess temperature of 1°C on average is generally observed.

The measurements at the emission of the devices were carried out according to two protocols: (1) BeReal and (2) simulated real-life conditions (according to two operating modes of the devices: modulation and on/off), over un period of two days approximately on each site:

- For more than two-thirds of the devices tested, the measured pollutant emission levels are low, with incoming energy emission factors of less than 630 g/GJ in CO and 25 g/GJ in solid particles whatever the load rate. Energy efficiencies are high, around 85 %;

- The other devices have performances that are just as high at sustained load rate (more than 40 % of the nominal power) but much lower at lower load rate (CO emission factors between 1000 and 1800 g/GJ, energy efficiency less than 80 %). These reduced load rates are used in particular when the stoves modulate or when they are oversized in relation to the heating needs. These drops in performance are linked to combustion air flow rates that are unsuitable for the fuel load introduced (high excess air), resulting from incorrect appliance settings and/or duct sizing (air supply, duct connection, flue) inappropriate (or not carried out).

All of the results are, moreover, higher (on average + 450% for CO and + 30% for PM) than the performances announced by the manufacturers, obtained in steady state, for standard optimal conditions.

Recommendations for the various players in the sector (device manufacturers, installers, users, standards writers) have been drafted (see Recommendations report). They aim to better take into account the actual use of the devices to ensure that the sizing of the ducts, the sizing of the appliances and their settings are well optimized in regard to combustion.

In conclusion, the intrinsic performance of pellet stoves is high, but their operation in real-life conditions remains perfectible, in particular by adjusting the power of the appliance to the heating needs of the dwelling and by adapting the sizing of the ducts.

1. Contexte

1.1. Contexte général

Les particules fines constituent aujourd'hui une des classes de polluants atmosphériques les plus préoccupantes en matière de santé publique. Les niveaux ambiants de particules fines (PM_{2,5}) sont responsables d'une baisse de l'espérance de vie de près d'une année en moyenne sur le territoire de l'Union européenne (Commission européenne, 2005). Par ailleurs, l'Afsset devenue Anses en 2010, conclut dans son rapport d'expertise de mars 2009 sur les particules fines, qu'il n'existe pas de seuil au-dessous duquel il n'y aurait pas d'impact sanitaire et que les expositions fréquentes à des niveaux modérés de pollution ont, en France, plus d'impact sanitaire que les pics (Afsset, 2009). Enfin, la mortalité liée à la pollution de l'air ambiant est un risque conséquent en France avec 40 000 décès attribuables chaque année aux particules fines (PM_{2,5}) (Santé publique France, 2021).

Ces constats ont servi de base au renforcement de la législation européenne sur la qualité de l'air ambiant en matière de PM_{2,5} (directive 2008/50/CE concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe), ainsi qu'à l'élaboration d'objectifs nationaux allant au-delà de cette réglementation européenne à relativement court terme. Ces objectifs, décrits notamment par le PNSE2 et le Plan Particules de juillet 2010, fixent une valeur cible de 15 µg/m³ de PM_{2,5} dans l'air ambiant pour 2015. La loi de modernisation de notre système de santé du 26 janvier 2016 impose une nouvelle valeur cible. Celle-ci a été définie à 10 µg/m³ d'ici 2030, par arrêté du 7 décembre 2016. L'atteinte de cet objectif particulièrement ambitieux nécessite un effort considérable de réduction des émissions à la source. La réduction des émissions des appareils de chauffage domestiques au bois peu performants et/ou obsolètes est un objectif du PNSE3 2015-2019 (action 51 concernant le secteur résidentiel et agricole). Le Plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (Prépa), adopté en 2017 afin de protéger la population et l'environnement, prévoit notamment la mise en place, sur certains territoires, de dispositifs (fonds air bois) visant à aider financièrement les particuliers au renouvellement des équipements de chauffage peu performants, ainsi qu'à sensibiliser les utilisateurs aux bonnes pratiques d'utilisation des appareils. Ce dispositif est cofinancé par l'ADEME et les collectivités territoriales. Pour les biens situés dans le périmètre d'un plan de protection de l'atmosphère (PPA), la loi « climat et résilience » du 22 août 2021 prévoit de prendre les mesures nécessaires pour améliorer la performance énergétique du parc d'appareils de chauffage au bois et atteindre une réduction de 50 % des émissions de particules fines PM_{2,5} issues de la combustion du bois à l'horizon 2030 par rapport à la référence de 2020. Cet objectif est décliné dans le plan d'action « *chauffage au bois domestique performant* » (juillet 2021) qui prévoit notamment d'accélérer le renouvellement des vieux poêles et inserts ainsi que des vieilles cheminées au profit d'équipements performants, de développer l'utilisation de combustibles de qualité et de rappeler les bonnes pratiques d'utilisation des appareils.

Selon l'inventaire du Citepa (rapport Secten, 2022) le secteur qui contribue le plus aux émissions primaires annuelles de PM_{2,5} en France est le chauffage domestique au bois (41 % pour l'année 2020). Pour ce secteur, 92 % environ des émissions de particules sont des particules fines (PM_{2,5}).

De plus, un des leviers pour améliorer la performance énergétique des bâtiments est de choisir un système de production de chauffage présentant un impact environnemental limité et une bonne efficacité énergétique. Les poêles à granulés sont des systèmes à énergies renouvelables à hautes performances. Leurs ventes ont beaucoup augmenté au cours des dernières années, notamment sur le marché français (174 000 ventes environ en 2021, +16,4 % de 2019 à 2021), pour atteindre des niveaux équivalents aux poêles à bûches (Observ'ER, 2022). Cependant les performances réelles in situ et l'impact sur la qualité de l'air de ces appareils ont été peu étudiés jusqu'à présent.

1.2. Positionnement de l'étude

Cette étude entend répondre au besoin croissant d'outils permettant une meilleure quantification des sources domestiques de particules fines, afin de mesurer l'effet des politiques publiques visant la réduction des concentrations de PM_{2.5} (tel que demandé par la directive 2008/50/CE, le PNSE2¹ et 3², le Prépa (arrêté et décret du 10 mai 2017), le Plan Particules, la loi Climat et Résilience ainsi que le plan d'action du gouvernement sur le chauffage au bois domestique) et, le cas échéant, de les réorienter, les moduler ou les renforcer afin d'atteindre leurs objectifs de réduction.

La réalisation de tests menés dans les conditions d'essais prescrites dans les normes NF EN 14785³ et NF EN 16510-1⁴ relatives aux appareils indépendants permet de comparer les appareils entre eux lors de leur mise sur le marché mais pas d'obtenir des résultats représentatifs de leurs émissions en conditions réelles de fonctionnement. En effet, les tests d'évaluation des performances des appareils sont réalisés à une seule allure (nominale), et dans des conditions de combustion établies donc optimales. Les résultats de ces tests ne rendent donc pas bien compte de la réalité, où chaque particulier régule l'énergie fournie par son poêle en fonction de son besoin en chauffage, et où chaque installation dispose d'un tirage différent. Ce dernier modifie de nombreux paramètres au sein du foyer, tels que le taux de charge et la qualité de la combustion, qui sont susceptibles de détériorer le rendement et d'augmenter les émissions de polluants. La réalisation d'essais *in situ* directement chez les particuliers, comme c'est le cas dans le cadre de cette étude, permet d'obtenir des résultats de mesures prenant en compte les conditions de fonctionnement des appareils en usage réel en termes d'allures de fonctionnement, de tirage, etc.

Cette étude doit permettre de mieux connaître, dans des conditions réelles de fonctionnement, les performances des poêles à granulés réputés les plus performants (Flamme verte 7 étoiles), lorsqu'ils fonctionnent à d'autres allures et dans d'autres conditions que celles étudiées selon les normes en vigueur NF EN 14785 et NF EN 16510-1.

1.3. Objectifs de l'étude

Les objectifs de l'étude sont de :

- Réaliser des campagnes de mesures *in situ* sur des poêles à granulés installés chez des particuliers, afin de caractériser leurs consommations électriques et de granulés, leurs performances énergétiques et leurs émissions de polluants atmosphériques ;
- Emettre des recommandations pour la filière professionnelle tant sur les innovations possibles que sur les points d'attention concernant l'installation, le dimensionnement des conduits, l'utilisation des poêles et du combustible ainsi que la maintenance des appareils (ces recommandations font l'objet d'un rapport spécifique intitulé « Rapport de recommandations ») ;
- Rédiger une fiche technique sur les poêles à granulés à destination du grand public.

En approvisionnant l'ensemble des sites d'essai avec le même lot de granulés (résineux), cette étude est menée en s'affranchissant de la qualité du combustible. Sur quelques sites d'essai, un second lot de granulés (feuillus) est testé afin de mieux cerner l'impact de l'essence de bois sur la qualité de la combustion. Notons que la majorité des volumes de bois sur pied disponibles en France est constituée de feuillus.

Les performances énergétiques des appareils ont été déterminées à partir des données collectées durant l'ensemble d'une saison de chauffe au moyen de capteurs placés dans les logements.

¹ Santé Environnement 2^e plan national 2009>2013, <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/PNSE2.pdf>

² Santé Environnement 3^e plan national 2015>2019, https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/PNSE3_v%20finale.pdf

³ NF EN 14785, Appareils de chauffage domestique à convection à granulés de bois - Exigences et méthodes d'essai, Août 2006

⁴ NF EN 16510-1, Appareils de chauffage domestiques à combustion solide - Partie 1 : exigences générales et méthodes d'essai, Juillet 2018

Les mesures de polluants atmosphériques à l'émission de chaque poêle à granulés ont été effectuées sur une période de deux jours en utilisant sur l'ensemble des sites un même protocole préalablement établi visant à se rapprocher d'un usage réel des appareils.

1.4. Partenaires

L'étude est menée par le groupement d'entreprises suivant :

- Solagro, en charge de la sélection des sites à instrumenter, leur approvisionnement et la réalisation des enquêtes ;
- Wigwam Conseil, en charge de l'instrumentation des sites d'essai, la réalisation et l'exploitation des mesures réalisées en continu sur une saison de chauffe ;
- Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), en charge de l'analyse des données énergétiques ;
- Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (Ineris), en charge de la gestion du projet, des caractérisations des émissions (mesures réalisées ponctuellement chez les particuliers), l'exploitation et l'analyse des données environnementales ainsi que de la rédaction des recommandations pour la filière et des livrables avec l'appui des autres partenaires.

Les campagnes de mesures ont été menées chez vingt particuliers, volontaires pour accueillir toute l'instrumentation nécessaire à l'étude dans leur logement durant la période d'essais. Lors des mesures de performances énergétiques, effectuées sur l'ensemble de la saison de chauffe 2020-2021, les réglages et l'environnement des poêles à granulés ont été définis par chaque occupant du logement. Lors des mesures environnementales, effectuées sur une période de deux jours, un même protocole d'usage de l'appareil a été mis en œuvre sur les vingt sites d'essais afin de comparer les résultats d'un site à l'autre. Ces dernières mesures effectuées durant la saison de chauffe 2021-2022 ont été décalées d'un an du fait de l'épisode de Covid-19.

Dans la suite du présent document, on entend par « site d'essais », un logement équipé d'un poêle à granulés raccordé à des conduits d'amenée d'air comburant et d'évacuation des fumées ; ces sites d'essais sont numérotés de C1 à C20 dans les graphes du présent rapport.

2. Sélection des sites

2.1. Critères de sélection des sites suivis

La liste des critères de sélection des sites suivis comprend :

- Des critères principaux jugés rédhibitoires, si non satisfaits par les sites :
 - o Type de logement : maison uniquement ;
 - o Utilisation des appareils à granulés en chauffage principal ;
 - o Appareils disposant du label Flamme Verte 7 étoiles (FV7*) ou équivalent ;
 - o Appareils avec sonde de température, sans bouilleur ;
 - o Appareils mis en place par un installateur certifié, reconnu garant de l'environnement (RGE) ;
 - o Accessibilité du conduit intérieur, **conduit d'amenée d'air dédié, directement raccordé à l'appareil (en configuration étanche) prélevant l'air à l'extérieur**, conduit simple paroi (pas de ventouse, ni de conduit concentrique) ;
 - o Deux modes de chauffage au maximum dans le logement ;
 - o Puissance nominale utile de l'appareil : 8 ± 1 kW ;
 - o Appareils récents installés à partir de 2016 ;
 - o Appareils entretenus régulièrement ;
 - o Appareils caractérisés sur le plan normatif (valeurs d'émission disponibles) ;
 - o Garage ou pièce de stockage pouvant contenir à minima une palette de granulés ;
 - o Couverture du réseau Lora, indispensable à la télétransmission des données acquises durant la saison de chauffe lors les mesures en continu ;
- Des critères secondaires :
 - o Age des logements : 50% des logements récents (après 2012), 30% des logements avant 1975 et 20% entre 1975 et 2012 ;
 - o Localisation des logements selon les zones climatiques (idéalement 50% en H1, 30% en H2 et 20% en H3) ;
 - o Répartition de la chaleur dans les pièces de nuit (15% des sites visés) ;
 - o Entretien effectué préalablement à la réalisation des mesures à l'émission ;
 - o Appareils disposant d'un contrat d'entretien ;
 - o Surface chauffée / surface habitable : la pièce dans laquelle est installé le poêle représente plus de 50% de la surface du logement ;
 - o Surface chauffée par le poêle de moins de 100 m² ;
 - o Mode de fonctionnement de l'appareil : manuel ou automatique.

D'autres données ont également été relevées :

- o Maison mitoyenne ou non, présence d'étage ;
- o Locataire ou propriétaire ;
- o Nombre de mois de présence dans le logement.

Pour la mise en place des capteurs des mesures *in-situ*, il a été choisi de ne sélectionner que des poêles à granulés disposant d'un conduit d'amenée d'air et d'un conduit de fumées avec raccordement en séparé (donc pas d'appareils munis de conduit concentrique).

Malgré nos vérifications sur dossiers lors du choix des sites, trois cas particuliers ne respectant pas ces critères sont apparus lors des mesures *in-situ* :

- Le conduit d'amenée d'air des sites n° 8 et 15 n'est pas raccordé directement au poêle à granulés (en configuration étanche). L'apport en air comburant est donc dépendant de l'air ambiant du logement ;
- Le poêle à granulés du site n° 12 est installé avec un conduit concentrique vertical. Lors des mesures *in-situ* en continu pendant la saison de chauffe, l'installation a été utilisée en l'état. Lors des mesures *in-situ* en non-continu, le conduit d'amenée d'air a été déconnecté du conduit concentrique, de sorte que l'apport en air comburant était alors dépendant de l'air ambiant du logement.

2.2. Echantillon de vingt sites retenus

La sélection des vingt sites suivis s'est déroulée en plusieurs étapes :

- Élaboration des critères de sélection des candidats ;
- Création d'un appel à candidature en ligne (utilisation d'un questionnaire en ligne) ;
- Analyse des deux cents candidatures et choix d'un échantillon restreint de vingt sites ;
- Enquête détaillée pour s'assurer de la bonne conformité des installations ;
- Choix final des sites (cf. Figure 1).

Des données complémentaires, nécessaires à l'analyse des résultats obtenus lors des mesures en continu lors d'une saison de chauffe et lors des interventions ponctuelles chez les particuliers, ont été ensuite collectées.



Figure 1 : carte des 20 sites retenus pour l'instrumentation du poêle à granulés (en bleu : zone climatique H1, en jaune : zone climatique H2, en rouge : zone climatique H3).

Sur les vingt sites retenus, tous sont des maisons non mitoyennes, sauf deux maisons mitoyennes, dont le mode de chauffage principal est assuré par un poêle à granulés. Ce poêle a été installé par un installateur RGE. Il est labellisé flamme verte 7 étoiles ou équivalent. Il est équipé d'une sonde de température pour permettre une régulation automatique et n'alimente ni radiateur, ni plancher chauffant.

Les caractéristiques de l'échantillon sont les suivantes :

- Quatorze poêles de puissance 8 kW, quatre de 9 kW et deux de 7 kW ;
- Seize poêles installés en 2018/2019, trois poêles en 2016/2017 et un poêle en 2020 ;
- Deux maisons construites avant 1975, seize entre 1976 et 2011 et deux après 2012 ;
- Dix particuliers utilisent leur poêle en marche automatique, trois en marche manuelle, six alternent les marches et un particulier n'a pas encore utilisé son poêle à la date de sélection des sites ;
- Sept maisons situées en zone climatique H1, neuf en zone H2 et quatre en zone H3 ;
- Neuf particuliers n'utilisent aucun chauffage d'appoint, dix utilisent de l'électricité et un a recours au gaz ;
- Dix-huit particuliers utilisent l'électricité pour la production de l'eau chaude sanitaire et deux utilisent le gaz.

Les données détaillées par candidat sont présentées dans le Tableau 1.

| Site n° | Zone climatique H1/H2/H3 | Chauffage appoint | Production ECS | Maison individuelle ou mitoyenne | Maison de plain-pied | Année de construction | Surface chauffée par le poêle (m ²) | Surface de la pièce du poêle (m ²) |
|---------|--------------------------|-------------------------|----------------|----------------------------------|----------------------|-----------------------|---|--|
| 1 | H2 | aucun | électricité | individuelle | non | 2012 ou après | 115 | 40 |
| 2 | H1 | gaz (inutilisé) | gaz | individuelle | non | entre 1976 et 2011 | 120 | 45 |
| 3 | H3 | aucun | électricité | individuelle | non | entre 1976 et 2011 | 89 | 35 |
| 4 | H2 | électricité | électricité | individuelle | oui | entre 1976 et 2011 | 113 | 52 |
| 5 | H1 | électricité (inutilisé) | électricité | individuelle | non | avant 1975 | 60 | 25 |
| 6 | H2 | électricité | électricité | individuelle | oui | entre 1976 et 2011 | 50 | 40 |
| 7 | H2 | électricité | électricité | individuelle | non | entre 1976 et 2011 | 75 | 35 |
| 8 | H1 | électricité | électricité | individuelle | non | entre 1976 et 2011 | 130 | 50 |
| 9 | H2 | électricité | électricité | individuelle | oui | avant 1975 | 70 | 70 |
| 10 | H1 | électricité | électricité | individuelle | non | entre 1976 et 2011 | 45 | 43 |
| 11 | H2 | électricité (inutilisé) | électricité | individuelle | non | 2012 ou après | 143 | 43 |
| 12 | H2 | aucun | électricité | individuelle | oui | entre 1976 et 2011 | 124 | 41 |
| 13 | H1 | électricité | électricité | individuelle | non | entre 1976 et 2011 | 70 | 28 |
| 14 | H1 | électricité | électricité | individuelle | non | entre 1976 et 2011 | 135 | 40 |
| 15 | H2 | électricité | électricité | individuelle | oui | entre 1976 et 2011 | 60 | 40 |
| 16 | H3 | électricité | électricité | individuelle | oui | entre 1976 et 2011 | 70 | 70 |
| 17 | H3 | aucun | électricité | individuelle | non | entre 1976 et 2011 | 120 | 40 |
| 18 | H1 | électricité (inutilisé) | électricité | mitoyenne | non | entre 1976 et 2011 | 88 | 35 |
| 19 | H2 | gaz | gaz | individuelle | oui | entre 1976 et 2011 | 85 | 63 |
| 20 | H3 | aucun | électricité | individuelle | oui | entre 1976 et 2011 | 75 | 45 |

Tableau 1 : données générales sur les maisons des 20 sites.

Pour une puissance moyenne de 8 kW (valeurs comprises entre 7 et 9 kW), la surface chauffée par le poêle, telle qu'annoncée par le particulier, est de 95 m² en moyenne, avec une surface minimale constatée de 45 m² pour l'un des sites et une surface maximale constatée de 143 m² pour un autre.

Dans l'échantillon retenu, dix marques et seize modèles de poêle différents font l'objet d'un suivi. Deux modèles d'appareils ont été testés à plusieurs reprises : cinq fois pour un premier modèle, deux fois pour un second.

| Site n° | Date d'installation du poêle | Puissance de votre poêle (kW) | Sur quelle marche utilisez-vous votre poêle ? |
|---------|------------------------------|-------------------------------|---|
| 1 | en 2018/2019 | 8,0 | les deux |
| 2 | en 2016/2017 | 8,0 | en marche automatique |
| 3 | en 2018/2019 | 8,0 | les deux |
| 4 | en 2020 | 8,0 | en marche automatique |
| 5 | en 2016/2017 | 8,0 | en marche manuelle |
| 6 | en 2018/2019 | 8,0 | en marche automatique |
| 7 | en 2016/2017 | 9,0 | en marche automatique |
| 8 | en 2018/2019 | 8,0 | en marche automatique |
| 9 | en 2018/2019 | 7,0 | les deux |
| 10 | en 2018/2019 | 8,0 | en marche manuelle |
| 11 | en 2018/2019 | 8,0 | les deux |
| 12 | en 2018/2019 | 8,0 | en marche automatique |
| 13 | en 2018/2019 | 9,0 | en marche automatique |
| 14 | en 2018/2019 | 8,0 | en marche automatique |
| 15 | en 2018/2019 | 8,0 | en marche automatique |
| 16 | en 2018/2019 | 9,0 | en marche automatique |
| 17 | en 2018/2019 | 9,0 | les deux |
| 18 | en 2018/2019 | 7,5 | les deux |
| 19 | en 2018/2019 | 8,0 | en marche manuelle |
| 20 | en 2018/2019 | 8,0 | en marche automatique |

Tableau 2 : données techniques des poêles installés.

2.3. Evaluation de la conformité des installations

Afin d'évaluer la conformité des installations, plusieurs éléments techniques ont été vérifiés sur dossier :

- L'installation du poêle a été réalisée par un installateur RGE ;
- La réalisation par un professionnel d'au moins un ramonage annuel ;
- Le conduit de cheminée sort 40 cm au moins au-dessus du faitage du toit ou de celui d'une maison voisine qui serait située à moins de 8 m ;
- L'évacuation des fumées se fait par un conduit spécifique au poêle à granulés ;
- Si un conduit existant a été réutilisé, il a été préalablement tubé ou son étanchéité a été vérifiée ;
- En l'absence d'une arrivée d'air primaire dédiée au poêle, pas de hotte aspirante dans la même pièce que le poêle. En présence d'une hotte dans la même pièce que le poêle, les particuliers se sont engagés à ne pas utiliser la hotte, durant toute la période des mesures, suivi en continu du 1^{er} novembre au 30 mars ainsi que lors des deux journées de mesures ponctuelles ;
- Le diamètre du conduit d'entrée d'air primaire correspond aux préconisations fournies par les constructeurs ;
- La distance par rapport au mur et la composition de ce dernier correspondent aux préconisations constructeurs ou installateur ;
- La présence d'un détecteur automatique de fumées (DAF).

2.4. Coûts d'investissement et d'exploitation

Le budget nécessaire pour l'achat et l'installation d'un poêle à granulés est précisé dans le Tableau 3.

| Coûts | Poêle | Pose | Fumisterie et protection murale ou sol | Total |
|---------|-------|------|--|-------|
| | € HT | € HT | € HT | € TTC |
| Moyenne | 3 610 | 543 | 922 | 4 979 |
| Médiane | 3 690 | 550 | 683 | 5 138 |
| Minimum | 1 705 | 155 | 88 | 2 707 |
| Maximum | 5 467 | 850 | 2 285 | 8 622 |

Tableau 3 : budget d'achat et d'installation d'un poêle à granulés.

Le prix d'achat d'un poêle à granulés varie entre 1 700 et 5 500 € hors taxes. Cette variabilité du prix peut être influencée par le rendement théorique du poêle, son autonomie, sa puissance ou encore son design.

A modèle équivalent, le prix d'achat d'un poêle à granulés peut varier de façon notable ($\pm 50\%$) selon l'installateur.

Le prix de la pose est de 550 € hors taxes en moyenne, avec une grande variabilité allant de 155 € à 850 € HT. Cette variabilité n'est pas uniquement liée à la complexité de l'installation, mais à des coûts forfaitaires appliqués par les installateurs.

Le coût de la fumisterie et des protections murales et sols nécessaires évolue de 100 à 2 300 € HT. Ce coût peut être minime lors d'un simple remplacement d'appareil. En moyenne, ce coût est de 900 € HT.

Le budget nécessaire à l'achat et à l'installation d'un poêle à granulés est en moyenne de 5 000 € TTC, auquel est intégrée une TVA de 5,5 % qui s'applique à cet investissement. Attention, certains installateurs pratiquent des taux de TVA de 10 %, voire 20 %.

Le prix d'un ramonage seul varie entre 30 et 90 € HT. Le prix moyen est d'environ 60 € HT (valeur basée sur six devis).

Le coût d'un entretien annuel, incluant le nettoyage du corps de chauffe et de la vis sans fin ainsi que le ramonage est d'environ 130 € HT selon l'enquête menée auprès des vingt particuliers. Des forfaits annuels d'entretien sont parfois proposés par les installateurs à des prix pouvant évoluer entre 150 et 220 € HT, incluant un contrôle du poêle plus poussé (nettoyage de la bougie et du ventilateur, démontage et graissage de la vis sans fin et parfois une remise sur certaines pièces d'usure). L'entretien annuel ne comprend pas le changement de pièces d'usures. Il est recommandé de remplacer la bougie tous les 3 à 6 ans, son coût peut varier de 40 à 80 € HT. Attention là encore, la TVA qui s'applique sur ces prestations d'entretien est de 10 %, mais elle varie de 5,5 % à 20 % selon les installateurs.

Entre 2017 et 2020, le prix d'achat moyen d'un sac de granulés de 15 kg était de 4,3 € TTC (résultats de l'enquête menée auprès des vingt particuliers). Ce prix varie entre 3,3 et 5,6 € TTC selon le lieu d'achat et le volume acheté. Le bas de la fourchette correspond à l'achat d'une ou deux palettes de sacs de granulés dans la grande distribution et le haut de la fourchette à l'achat de quelques sacs dans un magasin spécialisé. Ces chiffres sont cohérents avec ceux de l'enquête nationale sur les prix du combustible bois en 2019-2020⁵.

⁵ <https://bibliothèque.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/4450-enquete-sur-les-prix-des-combustibles-bois-en-2019-2020.html>

3. Analyse des granulés utilisés

L'ensemble des sites d'essai a été approvisionné pour la totalité de la saison de chauffe avec le même lot de granulés (résineux). En complément et afin de mieux cerner l'impact de l'essence du bois sur la qualité de la combustion, les émissions de polluants et les rendements énergétiques un second lot de granulés (feuillus) a été testé lors des mesures réalisées sur quelques sites d'essai. En effet, la majorité des volumes de bois sur pied disponibles en France sont des feuillus.

Les principales caractéristiques des granulés testés sont résumées dans le Tableau 4.

| Lot | | résineux | feuillus |
|----------------------|----------------------------|----------|----------|
| Humidité | % | 5,96 | 6,54 |
| Taux de cendres | % sur sec | 0,50 | 0,70 |
| PCI | MJ/kg sur brut | 17,30 | 16,88 |
| Diamètre moyen | mm | 6,1 | 6,4 |
| Longueur moyenne | mm | 17,9 | 17,3 |
| Taux de fines | % sur brut | 0,3 | 0,1 |
| Résistance mécanique | % | 98,7 | 99,3 |
| Masse volumique | kg/m ³ sur brut | 685 | 668 |
| C | % sur sec | 51,50 | 50,30 |
| H | % sur sec | 6,31 | 5,76 |
| O | % sur sec | 41,58 | 43,09 |
| N | % sur sec | 0,10 | 0,12 |
| S | % sur sec | < 0,01 | 0,01 |

Tableau 4 : résultats d'analyses des deux lots de granulés.

Les deux lots de granulés utilisés respectent les critères de certification DIN Plus.

Afin de caractériser la combustion de ces deux lots de granulés, ceux-ci ont été testés dans des conditions similaires en laboratoire sur un même poêle, préalablement à la réalisation des essais sur site. Les résultats obtenus mettent en exergue :

- Une qualité de combustion relativement similaire (teneurs en CO très proches) ;
- De plus faibles émissions d'oxydes d'azote (NO_x) lors de la combustion des granulés résineux qu'avec les granulés feuillus.

4. Campagnes de mesures des performances énergétiques des poêles : mesures en continu

4.1. Méthodologie des mesures réalisées en continu sur une saison de chauffe

Une campagne de mesures en continu sur site a été réalisée durant une saison de chauffe, de novembre 2020 à mars 2021, afin d'avoir une meilleure appréhension de la performance réelle des poêles à granulés. Cette campagne a permis notamment de caractériser la consommation réelle des poêles ainsi que leurs performances énergétiques. Ces mesures en continu ont été effectuées au moyen de différents capteurs placés sur chaque site.

4.1.1. Grandeurs mesurées durant la saison de chauffe

De nombreuses grandeurs ont été mesurées chez l'habitant durant les 5 mois de chauffe :

- **Les températures ambiantes** (°C) de plusieurs pièces (séjour, cuisine, chambres), afin de suivre l'impact du poêle à granulés sur la température intérieure. La température au niveau du thermostat d'ambiance du poêle est également suivie ;
- **La température du générateur de chaleur** (°C) dans une pièce de nuit lorsque celui-ci est présent, afin d'identifier la fréquence de chauffe de ce générateur, et son impact sur la température ambiante intérieure ;
- **La température extérieure** (°C) afin de suivre le comportement de chauffe du poêle en fonction des conditions extérieures ;
- **La température des fumées** du poêle (°C) ;
- **Le tirage du conduit** du poêle (Pa), mesuré via la méthodologie décrite dans la norme NF EN 14785 (2006), à partir d'un capteur de pression différentielle. La pression de tirage est suivie sur 1/3 des sites ;
- **La consommation électrique** du poêle (kWh) ;
- **La consommation de granulés** (kg).

Le matériel et la méthodologie utilisés pour suivre l'ensemble de ces grandeurs sont détaillés dans l'annexe 1 du rapport d'annexe.

Ces grandeurs mesurées sur site ont donné lieu à des exploitations par le calcul.

4.1.2. Grandeurs calculées

- **La consommation de l'autre énergie de chauffage** (kWh), lorsque celui-ci est présent, déterminée à partir d'un audit énergétique réalisé sur site, et d'une simulation thermique dynamique effectuée sur le logiciel STD Pleiades, de l'éditeur Izuba Energies ;
- **La durée de fonctionnement** du poêle (h), déduite de l'évolution de la consommation électrique du poêle dans le temps : la consommation relevée par le capteur de consommation est quasi nulle lorsque le poêle est à l'arrêt tandis qu'un appel de puissance électrique est constaté lorsque le poêle est en fonctionnement ;
- **Le rendement moyen du poêle à granulés** (η en %) qui correspond au rapport entre l'énergie restituée et l'énergie consommée. Le calcul est effectué, en moyenne, sur la période de mesure (période hivernale de début novembre 2020 à fin mars 2021), sur la base d'une adaptation des formules de calcul définies dans la norme NF EN 14785 (2006) ;
- **L'efficacité énergétique saisonnière** (η_s en %) calculée sur la base d'une adaptation des formules de calcul définies dans le règlement européen (UE) 2015/1185 du 24 avril 2015 concernant les exigences d'écoconception applicables aux dispositifs de chauffage décentralisés à combustible solide. L'efficacité énergétique saisonnière correspond au rendement moyen du poêle, auquel sont appliqués des facteurs correctifs afin de tenir compte des pertes de chaleur en usage réel comparé à un usage théorique, de valoriser les technologies de régulation de l'appareil et d'inclure les pertes énergétiques liés à l'apport en électricité ;

- **La puissance** du poêle (kW), calculée sur la base de la formule de calcul définie dans la norme NF EN 14785 (2006), qui fait intervenir le rendement moyen du poêle et la consommation en combustible ;
- **La production de chaleur utile** (kWh) calculée à partir de la puissance calculée, et la durée de fonctionnement du poêle ;
- **Taux de charge** du poêle (%) qui correspond au rapport entre la puissance calculée, et la puissance nominale du poêle ;
- **Taux de panne** du poêle (%) qui est déterminé à partir des retours que nous avons eu des habitants, sur la durée de panne du poêle.

Les méthodes de calcul de ces grandeurs sont plus amplement détaillées dans l'annexe 1, du rapport d'annexe.

4.1.3. Grandeurs complémentaires évaluées

Les grandeurs complémentaires évaluées dans le cadre de cette étude sont :

- **Le temps de surchauffe** du poêle (h) par rapport à la température de consigne (en mode automatique) ou la température de confort (en mode manuel) ;
- **Le ratio d'utilisation des différentes énergies** (%) ;
- **Surface moyenne chauffée par le poêle** (m²), déterminée à partir des températures enregistrées dans les différentes pièces et des périodes de fonctionnement du poêle et du chauffage d'appoint.

Le détail des méthodes appliquées pour ces estimations est fourni dans l'annexe 1 du rapport d'annexe.

4.1.4. Définition des journées types

Afin de mieux apprécier le fonctionnement des installations sur les différents sites, des journées spécifiques ont été analysées en détail.

- **La journée la plus froide de l'hiver**, afin d'observer les performances du poêle en conditions extrêmes de chauffage ;
- **3 journées hivernales typiques**, pour laquelle la température moyenne de la journée se rapproche de la température moyenne de la saison de chauffe.

Ces journées ont été définies pour chaque site instrumenté. Pour comparer le fonctionnement des équipements par site entre ces deux types de journées, seuls des jours ouvrés ont été retenus ; l'objectif étant d'obtenir une homogénéité des usages des poêles sur les journées sélectionnées. Les 3 journées hivernales typiques sont de plus des journées consécutives.

Pour déterminer ces journées, des moyennes journalières de la température extérieure de chaque site ont été calculées. La moyenne par site de l'ensemble de ces moyennes permet de connaître la température moyenne de la saison de chauffe. La journée la plus froide est choisie pour la température moyenne journalière calculée la plus faible (parmi les jours ouvrés). Les 3 journées hivernales typiques sont déterminées par leurs températures moyennes, celle-ci étant la plus proche de la température moyenne de la saison de chauffe (parmi les jours ouvrés). Une attention particulière a été portée à la présence des habitants dans leurs logements afin de s'assurer de la bonne acquisition des données durant ces journées.

4.2. Protocoles d'intervention appliqués aux sites

Les protocoles d'intervention sur site sont définis en fonction des différents cas identifiés.

4.2.1. Identification des différents cas d'intervention

Chaque site présente des particularités en termes de dispositif constructif, systémique et d'usage qu'il convient de prendre en compte dans le cadre de ce projet de suivi de la performance des systèmes de chauffage.

Pour cela, un questionnaire a préalablement été envoyé aux candidats et des entretiens téléphoniques ont été effectués. Ils ont permis d'affiner la compréhension des sites et ainsi de constater des similitudes et des différences notables entre eux.

Deux cas de figure apparaissent également en fonction de la présence ou de l'absence de métrologie spécifique du tirage durant l'ensemble de la saison de chauffe.

A partir de toutes les informations collectées, un travail de classification a été réalisé : quatre cas ont été identifiés.

4.2.2. Cas A : Avec mesure du tirage, absence d'énergie tiers de chauffage

Ces sites ont la particularité de ne pas avoir d'autres équipements de chauffage que le poêle à granulés dans la pièce de vie. L'appoint ne pouvant être réalisé dans les différentes pièces de la maison, une hétérogénéité accrue de la température d'ambiance doit certainement être constatée dans ces sites en période de chauffage et notamment pour ce qui concerne les pièces de nuits indépendantes aérauliquement de la pièce où est installée le poêle.

C'est pour cette raison qu'a été proposée dans ce cas la mise en place d'un système métrologique de relevé de la température plus important : une deuxième pièce de nuit est suivie en continu et un troisième capteur en pièce de vie a été installé (dans la cuisine, la double hauteur en présence d'une mezzanine, etc.).

4.2.3. Cas B : Sans mesure du tirage, absence d'énergie tiers chauffage

Les remarques du cas précédent s'appliquent au cas présent mais cette fois-ci sans suivi du tirage dans le conduit du poêle.

4.2.4. Cas C : Avec mesure du tirage, impossibilité de mesurer l'énergie tiers de chauffage

Ces sites sont équipés d'un système de chauffage d'appoint (électrique ou gaz) mais la technologie de desserte énergétique ne permet pas d'être suivie en télérelevé (absence de compteur impulsionnel d'énergie spécifique pour le chauffage, chauffage électrique décentralisé sans départ unique au tableau électrique, etc.).

Dans ces conditions, une évaluation de la consommation de chauffage de la maison doit être réalisée.

Deux types d'estimation ont été réalisés :

- Basée sur une estimation théorique (simulation thermique dynamique), des conditions météorologiques de la saison de chauffage 2020/2021 et analyse des factures énergétiques. Ainsi, un audit énergétique avec relevé des hypothèses dimensionnelles, architecturales, techniques (parois et systèmes) et usage (habitudes, programmation, consignes) a été réalisé.
- Basée sur une estimation par collecte et analyse des factures ainsi qu'un suivi de la méthodologie proposée dans l'étude Ceren (Centre d'études de recherches économiques sur l'énergie) suivantes : Part du bois dans les consommations de chauffage des maisons individuelles.

4.2.5. Cas D : Sans mesure du tirage, impossibilité de mesurer l'énergie tiers de chauffage

Remarques similaires au cas précédent mais cette fois ci sans suivi du tirage dans le conduit du poêle. Pour affiner encore l'estimation, une approche de la température moyenne de la maison se doit d'être réalisée. La mise en place d'un système métrologique de relevé de la température encore plus important que dans le cas précédent a été proposé. Une deuxième pièce de nuit est suivie en continu et un troisième capteur est installé en pièce de vie (cuisine, double hauteur mezzanine, etc.).

Pour rappel, conformément aux discussions avec l'Ademe, seulement sept sites sur les vingt ont été instrumentés en mesure du tirage.

A partir de toutes les informations collectées, un travail de classification a été réalisé : quatre cas ont été identifiés. Le matériel métrologique pour chacun d'eux est détaillé dans le rapport métrologique :

| N° des sites | Zone climatique | Année de construction | Quels sont vos autres modes de chauffage? | | | Cas A Avec mesure du tirage, absence d'énergie tiers de chauffage | Cas B Sans mesure du tirage, absence d'énergie tiers de chauffage | Cas C Avec mesure du tirage, présence d'énergie tiers de chauffage sans possibilité de la mesurer | Cas D Sans mesure du tirage, présence d'énergie tiers de chauffage sans possibilité de la mesurer |
|--------------|-----------------|-----------------------|---|--------------------------------------|--------------------------------------|---|---|--|--|
| | | | Aucun autre système de chauffage | Appoint de chauffage par Electricité | Appoint de chauffage par Gaz Naturel | | | | |
| 1 | H2 | 2012 ou après | x | | | x | | | |
| 2 | H1 | Entre 1976 et 2011 | x | | | | x | | |
| 3 | H3 | Entre 1976 et 2011 | x | | | | x | | |
| 4 | H2 | entre 1976 et 2011 | | x | | | | | x |
| 5 | H1 | Avant 1975 | x | | | x | | | |
| 6 | H2 | Entre 1976 et 2011 | | x | | | | x | |
| 7 | H2 | Entre 1976 et 2011 | | x | | | | | x |
| 8 | H1 | Entre 1976 et 2011 | | x | | | | | x |
| 9 | H2 | avant 1975 | | x | | | | | x |
| 10 | H1 | Entre 1976 et 2011 | | x | | | | | x |
| 11 | H2 | 2012 ou après | x | | | x | | | |
| 12 | H2 | Entre 1976 et 2011 | x | | | x | | | |
| 13 | H1 | Entre 1976 et 2011 | | x | | | | | x |
| 14 | H1 | Entre 1976 et 2011 | | x | | | | | x |
| 15 | H2 | Entre 1976 et 2011 | | x | | | x | | |
| 16 | H3 | entre 1976 et 2011 | | x | | | | | x |
| 17 | H3 | Avant 1975 | x | | | x | | | |
| 18 | H1 | entre 1976 et 2011 | x | | | | x | | |
| 19 | H2 | entre 1976 et 2011 | | | x | | | | x |
| 20 | H3 | entre 1976 et 2011 | x | | | | x | | |

Tableau 5 : synthèse des différents cas d'intervention



-  Site ayant une deuxième énergie de chauffage estimée par audit énergétique et facture énergétique
-  Site n'ayant pas de deuxième énergie de chauffage

Figure 2 : sites équipés d'une seconde énergie de chauffage.

4.3. Difficultés rencontrées lors du déploiement de l'instrumentation et de son suivi

4.3.1. Mise en place de l'instrumentation

Dans le cadre du présent marché, l'installation métrologique devait être mise en place et fonctionnelle pour le 1^{er} novembre 2020, date convenue avec le donneur d'ordre pour le démarrage de la période d'analyse.

Néanmoins la crise sanitaire liée au COVID-19 et le premier confinement de 2020 ont fortement impacté les premières étapes de l'étude, notamment la sélection des sites, le choix du matériel métrologique nécessaire en cohérence avec les types de cas rencontrés, le percement des conduits en sortie de chaque poêle, par les installateurs, nécessaires à la mise en place de l'instrumentation, la commande des capteurs auprès des fournisseurs, en particulier étrangers, du fait d'une augmentation des délais de livraison.

Enfin la couverture LoRa insuffisante de certains sites a nécessité l'envoi de sondes témoins pour tester la faisabilité technique de l'instrumentation ce qui a également retardé la mise en place des capteurs et conduit parfois à refuser certains sites non suffisamment couverts.

Afin de respecter les délais dans le contexte sanitaire de l'année 2020, cette phase a nécessité un travail important, une bonne coordination et réactivité des différents partenaires et sous-traitant du projet.

4.3.1.1. Aléas techniques et méthodologie de réception des données

Malgré la sélection des sites incluant ce critère de choix, la bonne couverture en réseau LoRa n'a pas toujours été confirmée une fois les capteurs mis en place dans chaque pièce des maisons. En effet, pour certains sites qui étaient pourtant indiqués comme couverts à 5/5 en extérieur et intérieur, la qualité de réception restait trop fluctuante et engendrait des défauts d'envoi de données plus ou moins importants en fonction des sites.

Pour cette raison, la fourniture d'un boîtier antenne relai locale connecté à la Box (via un câble Ethernet) du particulier a donc été nécessaire pour neuf des vingt sites. A noter que pour un de ces sites, un boîtier avec option 3G/4G a été privilégié compte tenu de la faiblesse du réseau internet du foyer (interférence avec l'utilisation de la télévision du foyer trop inconfortable lors de l'envoi du boîtier Ethernet).

Notons que, malgré ces difficultés, la réception des données a globalement toujours été bonne (réception de plus de 95 % des données sur les vingt sites dès les premières semaines d'instrumentation, ce qui a permis tout de même d'analyser dans de bonnes conditions les données acquises).

4.3.1.2. Suivi continu de l'instrumentation

Les taux de fonctionnement de l'instrumentation correspondent au pourcentage de réussite dans la collecte des données mesurées (toutes les 10 mn et toutes les heures). Ils ont été calculés sur la période de mesure pour chaque site. Le taux de fonctionnement minimum constaté sur l'ensemble des sites pour chaque type de mesure est élevé. Pour les valeurs horaires, plus de 98,5 % des données ont été relevées. Le taux de fonctionnement sur le pas de temps de 10 min est légèrement inférieur (97 %) sans pour autant remettre en question les analyses et interprétations réalisées.

4.4. Résultats métrologiques du suivi continu sur une saison de chauffe

4.4.1. Ensemble de la période de chauffe

4.4.1.1. Informations préliminaires

Conformément à la méthodologie définie, des audits énergétiques ont été réalisés sur le premier semestre 2021 pour permettre d'approcher la consommation énergétique des sites au regard :

- De leur localisation géographique, leur orientation et leur environnement proche (masque solaire notamment) ;
- De la performance de leur enveloppe thermique (parois opaques, vitrages, ponts thermiques, etc.) ;
- De leur système énergétique (type de production/émission d'appoint, VMC, etc.) ;

- Des habitudes d'usage des habitants et des spécificités de cet hiver (confinement dû à la pandémie notamment).

Ces audits énergétiques ont été complétés d'une analyse systématique des factures de chauffage des particuliers afin de disposer de deux clefs de lecture différentes et de lisser les erreurs de modélisation et d'interprétation de chacune des maisons auditées.

L'ensemble des données mesurées ont fait l'objet de rendus graphiques intermédiaires qui ont été accompagnés d'analyse site par site permettant succinctement de tirer de premiers enseignements sur le fonctionnement du poêle dans son environnement spécifique (bâti, climat extérieur et interactions usagers). Au regard du nombre de rendus et des spécificités de chaque site, ces analyses croisées Poêle / Bâti / Usagers ne sont pas présents dans ce rapport final.

En résumé, sont présentées dans le *Tableau 6* :

- Les consommations sur la période de mesure (du 1^{er} novembre 2020 au 30 mars 2021, soit cinq mois au total, en période de chauffe) de l'énergie d'appoint déduites des audits ;
- Les consommations de granulés déduites de deux manières différentes :
 - o Comptage du nombre de sacs de granulés utilisés par les particuliers (inventaire avant/après par l'habitant) ;
 - o Comptage par capteur interne au poêle sur trois sites.

Pour les sites n° 16 et n° 20, l'écart entre les deux méthodes de comptage est important. Le relevé effectué par le particulier a été confirmé. Nous ne pouvons donc expliquer cet écart. Il semblerait que le comptage automatique soit à ce jour moins fiable que le comptage manuel du nombre de sacs utilisés.

| Consommation | Site 1 | | | Site 2 | | | Site 3 | | |
|---|------------|-------|----------------------|------------|-------|----------------------|------------|-------|----------------------|
| | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * |
| <i>Granulés</i> Méthode comptage des sacs | 420 | 1 838 | 16 | 1 305 | 5 712 | 48 | 1 148 | 5 022 | 56 |
| <i>Granulés</i> Méthode capteur RIKA | Sans objet | | | Sans objet | | | 1 093 | 4 784 | 54 |
| <i>Autre énergie de chauffage</i> | Sans objet | | | Sans objet | | | Sans objet | | |

| Consommation | Site 4 | | | Site 5 | | | Site 6 | | |
|---|------------|-------|----------------------|------------|-------|----------------------|------------|-------|----------------------|
| | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * |
| <i>Granulés</i> Méthode comptage des sacs | 1 305 | 5 818 | 46 | 1 613 | 7 004 | 105 | 1 260 | 5 479 | 50 |
| <i>Granulés</i> Méthode capteur RIKA | Sans objet | | | Sans objet | | | Sans objet | | |
| <i>Autre énergie de chauffage</i> | x | 1 691 | 13 | Sans objet | | | x | 1 580 | 14 |

| Consommation | Site 7 | | | Site 8 | | | Site 9 | | |
|---|------------|-------|----------------------|------------|--------|----------------------|------------|-------|----------------------|
| | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * |
| <i>Granulés</i> Méthode comptage des sacs | 1 095 | 4 557 | 54 | 2 370 | 10 294 | 89 | 2 115 | 8 903 | 51 |
| <i>Granulés</i> Méthode capteur RIKA | Sans objet | | | Sans objet | | | Sans objet | | |
| <i>Autre énergie de chauffage</i> | x | 3 328 | 39 | x | 855 | 7 | x | 822 | 5 |

| Consommation | Site 10 | | | Site 11 | | | Site 12 | | |
|---|------------|-------|----------------------|------------|-------|----------------------|------------|-------|----------------------|
| | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * |
| <i>Granulés</i> Méthode comptage des sacs | 810 | 3 522 | 32 | 690 | 3 000 | 20 | 1 440 | 6 227 | 50 |
| <i>Granulés</i> Méthode capteur RIKA | Sans objet | | | Sans objet | | | Sans objet | | |
| <i>Autre énergie de chauffage</i> | x | 2 686 | 24 | Sans objet | | | Sans objet | | |

| Consommation | Site 13 | | | Site 14 | | | Site 15 | | |
|---|------------|-------|----------------------|------------|-------|----------------------|------------|-------|----------------------|
| | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * |
| <i>Granulés</i> Méthode comptage des sacs | 960 | 4 215 | 60 | 698 | 4 215 | 31 | 1 260 | 5 454 | 52 |
| <i>Granulés</i> Méthode capteur RIKA | Sans objet | | | Sans objet | | | Sans objet | | |
| <i>Autre énergie de chauffage</i> | x | 260 | 4 | Sans objet | | | x | 622 | 6 |

| Consommation | Site 16 | | | Site 17 | | | Site 18 | | |
|--|---------|-------|----------------------|------------|-------|----------------------|------------|-------|----------------------|
| | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * |
| Granulés <i>Méthode comptage des sacs</i> <i>Méthode capteur RIKA</i> | 1 485 | 6 450 | 52 | 1 170 | 5 065 | 42 | 1 740 | 7 407 | 84 |
| | 1 184 | 5 142 | 41 | Sans objet | | | Sans objet | | |
| Autre énergie de chauffage | x | 724 | 6 | Sans objet | | | Sans objet | | |

| Consommation | Site 19 | | | Site 20 | | |
|--|------------|-------|----------------------|------------|-------|----------------------|
| | kg | kWh | kWh/m ² * | kg | kWh | kWh/m ² * |
| Granulés <i>Méthode comptage des sacs</i> <i>Méthode capteur RIKA</i> | 765 | 3 348 | 22 | 1 110 | 4 858 | 65 |
| | Sans objet | | | 847 | 3 707 | 49 |
| Autre énergie de chauffage | x | 4 970 | 33 | Sans objet | | |

* La surface considérée correspond :

- Pour les sites audités, à la surface modélisée sur l'étude thermique dynamique basée sur les plans et/ou les relevés sur sites ;
- Pour les sites non audités (sans énergie d'appoint), à la surface transmise par les particuliers (réponse au questionnaire de candidature). Cette surface, ainsi que le volume chauffé, sont donc à considérer avec vigilance.

Tableau 6 : consommation en granulés et en énergie d'appoint des vingt sites étudiés.

Pour chaque site, la répartition du chauffage entre les granulés et l'autre énergie de chauffage est présentée sur la figure ci-dessous. 50 % des sites n'ont pas besoin d'autre énergie de chauffage. Pour les sites restants, le besoin de l'autre énergie de chauffage est de 23 % en moyenne (16 % en valeur médiane). Le besoin minimum de l'autre énergie de chauffage est de 6 % pour le site 13, et de 60 % au maximum pour le site 19. La grande différence de besoin de l'autre énergie de chauffage entre les sites dépend de nombreux paramètres tels que le positionnement du poêle dans la maison et la compacité de la maison. Pour le site 19, le poêle est positionné dans un coin du salon, et les chambres de cette maison sont éloignées du salon. À cela s'ajoute le fait que c'est un salon cathédrale.

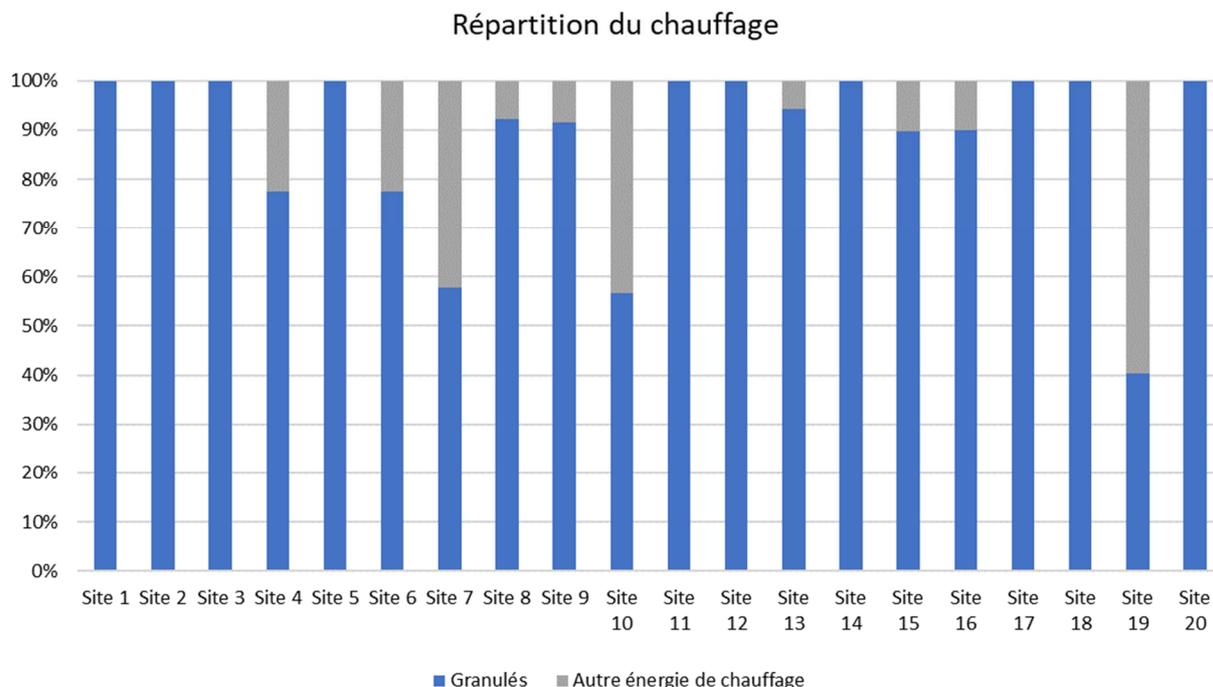


Figure 3 : consommation en granulés et en énergie d'appoint des vingt sites étudiés.

4.4.1.2. Synthèse des résultats

Les grandeurs calculées sont présentées dans le *Tableau 7* pour l'ensemble des sites.

| Site | Df (h) | Consommation granulés (kg) | Consommation horaire moyenne (kg/h) | Température moyenne fumées (°C) | Température moyenne ambiante (°C) | Taux de CO2 (%) | Rendement moyen (%) | Efficacité énergétique saisonnière (%) | Puissance du poêle (kW) | Production de chaleur utile (kWh) | Taux de charge de l'appareil (%) | Pression tirage en fonctionnement (Pa) | Pression tirage à l'arrêt (Pa) |
|------|--------|----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------|---------------------|--|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|--------------------------------|
| 1 | 396 | 420 | 1,06 | 102,11 | 19,66 | 4,00 | 84,96 | 80,44 | 4,33 | 1715,15 | 54,14 | 15,55 | 1,18 |
| 2 | 887 | 1305 | 1,47 | 98,40 | 19,33 | 3,86 | 85,13 | 80,65 | 6,02 | 5337,40 | 75,20 | - | - |
| 3 | 703 | 1148 | 1,63 | 114,37 | 20,05 | 4,48 | 84,68 | 80,06 | 6,65 | 4672,64 | 83,08 | - | - |
| 4 | 808 | 1305 | 1,62 | 113,11 | 21,68 | 4,43 | 84,69 | 80,17 | 6,57 | 5312,04 | 82,18 | - | - |
| 5 | 1413 | 1613 | 1,14 | 147,67 | 18,63 | 5,79 | 83,45 | 78,26 | 4,58 | 6469,60 | 57,20 | 22,30 | 3,57 |
| 6 | 1090 | 1260 | 1,16 | 104,07 | 18,24 | 4,08 | 84,56 | 79,21 | 4,70 | 5121,10 | 58,73 | 12,80 | 2,80 |
| 7 | 1310 | 1095 | 0,84 | 84,96 | 19,83 | 3,33 | 85,43 | 80,05 | 3,43 | 4496,29 | 39,45 | - | - |
| 8 | 2259 | 2370 | 1,05 | 113,43 | 20,47 | 4,45 | 84,65 | 79,55 | 4,27 | 9642,70 | 48,51 | - | - |
| 9 | 2555 | 2115 | 0,83 | 118,23 | 23,03 | 4,63 | 84,76 | 78,92 | 3,37 | 8616,60 | 48,18 | - | - |
| 10 | 922 | 810 | 0,88 | 98,30 | 21,30 | 4,11 | 84,99 | 79,87 | 3,59 | 3308,70 | 44,30 | - | - |
| 11 | 363 | 690 | 1,90 | 91,60 | 19,04 | 3,59 | 85,13 | 80,08 | 7,78 | 2823,20 | 97,20 | 14,06 | 2,75 |
| 12 | 2655 | 1440 | 0,54 | 87,50 | 20,60 | 3,43 | 85,56 | 78,75 | 2,23 | 5922,10 | 27,88 | 8,06 | 0,73 |
| 13 | 750 | 960 | 1,28 | 104,27 | 19,89 | 4,09 | 84,79 | 79,38 | 5,22 | 3912,40 | 57,30 | - | - |
| 14 | 1547 | 698 | 0,45 | 85,20 | 19,50 | 3,34 | 85,29 | 79,76 | 1,85 | 2861,40 | 23,40 | - | - |
| 15 | 1161 | 1260 | 1,09 | 133,20 | 21,97 | 5,22 | 84,23 | 79,30 | 4,39 | 5101,20 | 54,92 | 9,85 | 0,35 |
| 16 | 803 | 1485 | 1,85 | 97,40 | 19,80 | 3,82 | 85,17 | 80,60 | 7,57 | 6079,18 | 84,11 | - | - |
| 17 | 973 | 1170 | 1,20 | 104,20 | 21,19 | 4,08 | 85,22 | 80,09 | 4,93 | 4792,30 | 54,73 | 12,78 | 2,31 |
| 18 | 1525 | 1740 | 1,14 | 83,00 | 21,03 | 3,25 | 85,89 | 80,61 | 4,71 | 7183,26 | 62,80 | - | - |
| 19 | 567 | 765 | 1,35 | 104,92 | 19,89 | 4,11 | 84,86 | 80,34 | 5,50 | 3120,20 | 68,79 | - | - |
| 20 | 859 | 1110 | 1,29 | 95,75 | 22,27 | 3,75 | 85,75 | 81,14 | 5,33 | 4574,58 | 66,57 | - | - |

Tableau 7 : synthèse des données moyennes calculées pour la totalité de la période hivernale pendant la durée de fonctionnement du poêle, sur les différents sites.

Des valeurs très variables de durées de fonctionnement du poêle sont observées selon les sites, allant de 363 heures de fonctionnement en cumulé sur la période hivernale (pour le site n° 1) à 2 655 heures (pour le site n° 12). La moyenne de durée de fonctionnement des poêles pour l'ensemble des sites, est de 1177 heures, et la médiane de 978 heures.

Parallèlement, des puissances et taux de charge variés sont également obtenus pour les différents sites testés :

- Puissance minimale : 1,9 kW pour le site n° 14 / puissance maximale : 7,8 kW pour le site n° 11 / puissance moyenne et médiane : 5 kW ;
- Taux de charge minimal : 23 % pour le site n° 14 / taux de charge maximal : 97 % pour le site n° 11 / taux de charge moyen et médian : 60 %.

Une comparaison des données des *Tableau 6* et *Tableau 7*, illustrée sur la Figure 4, met en évidence une corrélation (relation linéaire, avec un facteur de corrélation de 0,71) entre la consommation électrique du poêle et sa durée de fonctionnement, en considérant l'ensemble des sites excepté le site n° 12 (pour lequel la consommation électrique est nettement supérieure à celle des autres sites, y compris ceux dont la durée de fonctionnement est assez proche). Sachant que ce site présente la particularité d'être équipé d'un conduit concentrique, qui a dû être partiellement remplacé par un conduit simple paroi pour les besoins de cette étude, il est probable que cela ait affecté son fonctionnement (et par voie de conséquence, sa consommation électrique).

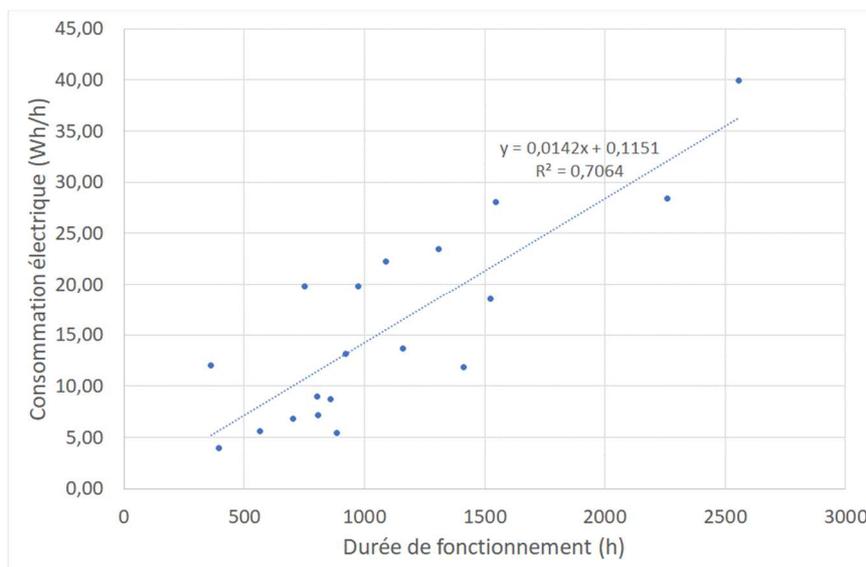


Figure 4 : consommation électrique en fonction de la durée de fonctionnement du poêle, en considérant l'ensemble des sites, excepté le site 12.

Comme le montre la *Figure 10*, une corrélation linéaire (avec un facteur de corrélation de 0,89) se dégage également entre la consommation en granulés et la durée de fonctionnement. Pour un appareil donné (avec un rendement moyen donné), à une puissance fixe, la consommation en granulés va augmenter de façon linéaire avec la durée de fonctionnement du poêle. Dans le cas de cet échantillon, le fait que les rendements moyens sur la période hivernale des différents poêles à granulés testés soient très proches les uns des autres (valeur minimale : 83 % / valeur maximale : 86 % / valeur moyenne et médiane : 85 %) permet également d'obtenir une telle tendance pour des appareils pourtant différents les uns des autres.

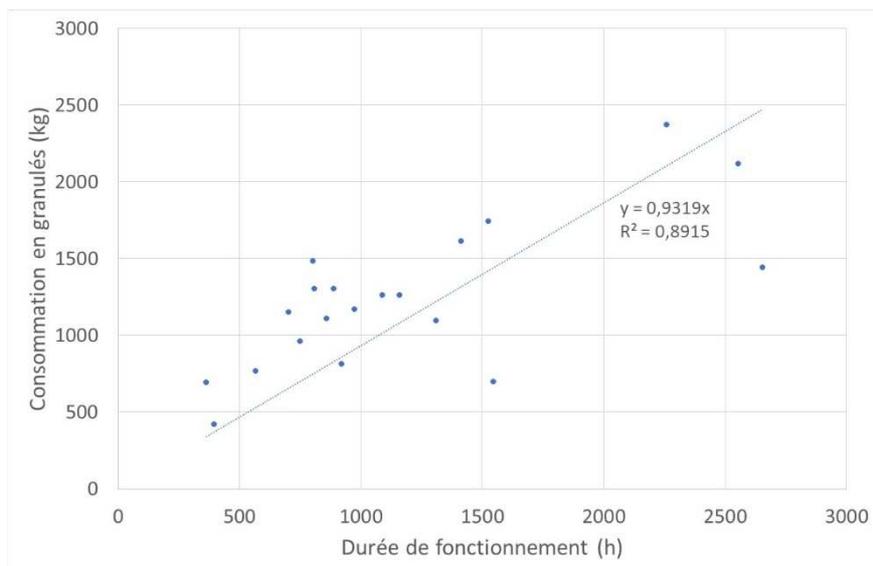


Figure 5 : consommation en granulés en fonction de la durée de fonctionnement du poêle.

Des calculs complémentaires (non présentés dans le *Tableau 7*) montrent par ailleurs que, pour chacun des sites étudiés, la puissance moyenne du poêle, calculée sur sa durée de fonctionnement, varie très peu (de moins de 0,2 kW) selon les périodes considérées (jour : 6h - 21h / nuit : 21h01 - 5h59 / semaine / week-end). Parallèlement, la Figure 6 représente la durée de fonctionnement relative du poêle à granulés pour chacune des périodes considérées, exprimée en pourcentage par rapport à la durée totale de chaque période sur la période hivernale. Comme le montre cette figure, si la durée relative de fonctionnement le jour est globalement plus élevée que la durée relative de fonctionnement la nuit pour la plupart des sites (comme attendu), il est surprenant de constater que ce n'est pas le cas pour les sites n° 9, 12 et 15, et que l'écart est faible entre ces deux périodes pour le site n° 19. Cette figure permet également de constater que la durée de fonctionnement relative est *a minima* identique, et parfois plus longue, le week-end comparé à la semaine.

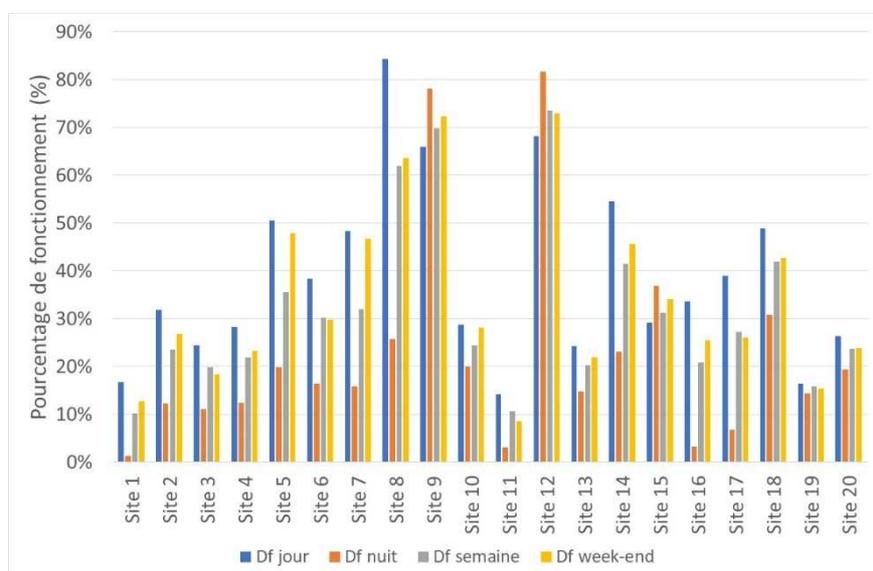


Figure 6 : pourcentage de fonctionnement selon les périodes d'utilisation.

Enfin, il apparaît dans le *Tableau 7* que, pour l'ensemble des sites instrumentés avec un capteur de pression, l'augmentation du tirage dans le conduit est corrélée au fonctionnement du poêle à granulés. Ceci est cohérent avec la création d'un tirage dans le conduit d'évacuation des fumées. Ce tirage est conjointement naturel sous l'effet de la chaleur produite par l'appareil de chauffage et forcé par la mise en fonctionnement du ventilateur d'extraction des fumées intégré au poêle (qui permet *a minima* de compenser la perte de charge de l'appareil lui-même). Notons en outre que les valeurs de tirage relevées

dans cette étude sont globalement élevées par rapport à la valeur de tirage optimum définie par les fabricants :

- Au cours de cette étude, pour des poêles fonctionnant en allure intermédiaire, les valeurs mesurées sont de 8 Pa (minimal) à 22 Pa (maximal), pour une valeur moyenne de 14 Pa et une valeur médiane de 13 Pa ;
- D'après les données fabricants, le tirage requis est de 0 à 12 Pa (selon les appareils) en allure nominale et de 0 à 6 Pa (selon les appareils) en allure réduite.

Ces données laissent ainsi apparaître que l'ensemble des installations instrumentées d'un capteur de pression au cours de cette étude, ont fonctionné dans des conditions de tirage supérieures à celles préconisées par le fabricant. Ceci induit :

- Un excédent d'apport d'air comburant ;
- Un usage récurrent de l'appareil à un point de fonctionnement non optimisé par le fabricant (et potentiellement source d'une quantité plus importante de polluants) ;
- Une surconsommation électrique du ventilateur d'extraction des fumées par rapport au fonctionnement optimum.

Le *Tableau 8* regroupe les données de température de consigne et écart toléré par rapport à la température de consigne (tels que renseignés par le particulier dans son questionnaire) ainsi que les températures moyennes mesurées au cours de la période hivernale dans le séjour et les pièces adjacentes non cloisonnées.

| | Température de consigne moyenne le jour | Température de consigne moyenne la nuit | Température de consigne moyenne | Delta T _{consigne} pour allumage | Delta T _{consigne} pour extinction | Température moyenne dans le Séjour, le jour | Température moyenne dans le Séjour, la nuit | Température moyenne dans le Séjour (au global) |
|------------|---|---|---------------------------------|---|---|---|---|--|
| | (°C) | (°C) | (°C) | (°C) | (°C) | (°C) | (°C) | (°C) |
| C1 | 19 | 16 | 18 | -1 | 1 | 21 | 20 | 21 |
| C2 | 20,5 | 17 | 19 | -0,5 | 0,5 | 20 | 19 | 20 |
| C3 | 17 | 19 | 18 | -0,5 | 0,5 | 19 | 20 | 19 |
| C4 | 21 | 21 | 21 | -0,5 | 0,5 | 22 | 21 | 22 |
| C5 | 22 | 16 | 20 | -4 | 0,5 | 19 | 20 | 19 |
| C6 | 20 | 17 | 19 | -2 | 0,5 | 18 | 18 | 18 |
| C7 | 20 | 16 | 19 | -1 | 3 | 20 | 20 | 20 |
| C8 | 22 | 18 | 21 | -0,5 | 0,5 | 21 | 20 | 20 |
| C9 | 22 | 21 | 22 | -1 | 1 | 22 | 23 | 23 |
| C10 | 19 | 19 | 19 | -0,5 | 0,5 | 18 | 20 | 19 |
| C11 | 20 | 17 | 19 | -0,5 | 0,5 | 20 | 19 | 19 |
| C12 | 20 | 18 | 19 | -1 | 1 | 21 | 21 | 21 |
| C13 | 19 | 17 | 18 | -0,5 | 0,5 | 20 | 19 | 20 |
| C14 | 23 | 20 | 22 | -1 | 1 | 20 | 19 | 20 |
| C15 | 20 | 18 | 19 | -0,5 | 0,5 | 22 | 22 | 22 |
| C16 | 19 | 19 | 19 | -1 | 1 | 20 | 19 | 20 |
| C17 | 23 | 23 | 23 | -0,5 | 0,5 | 21 | 21 | 21 |
| C18 | 20 | 18 | 19 | -0,5 | 0,5 | 21 | 21 | 21 |
| C19 | 20 | 19 | 20 | -0,5 | 0,5 | 20 | 20 | 20 |
| C20 | 23 | 23 | 23 | -0,5 | 0,5 | 23 | 23 | 23 |

Tableau 8 : température de consigne, écart toléré par rapport à la température de consigne ; température moyenne mesurée au cours de la période hivernale dans le séjour et les pièces adjacentes non cloisonnées.

Sur la base de ces données, la Figure 7 permet de comparer la température ambiante moyenne mesurée dans le séjour et les pièces adjacentes non cloisonnées durant la période hivernale à la température de consigne renseignée par le particulier dans son questionnaire (calculée comme la moyenne pondérée entre la température de consigne du jour, de 6h et 21h, et la température de consigne de la nuit, de 21h01 à 5h59, sauf indications horaires différentes pour la température de consigne).

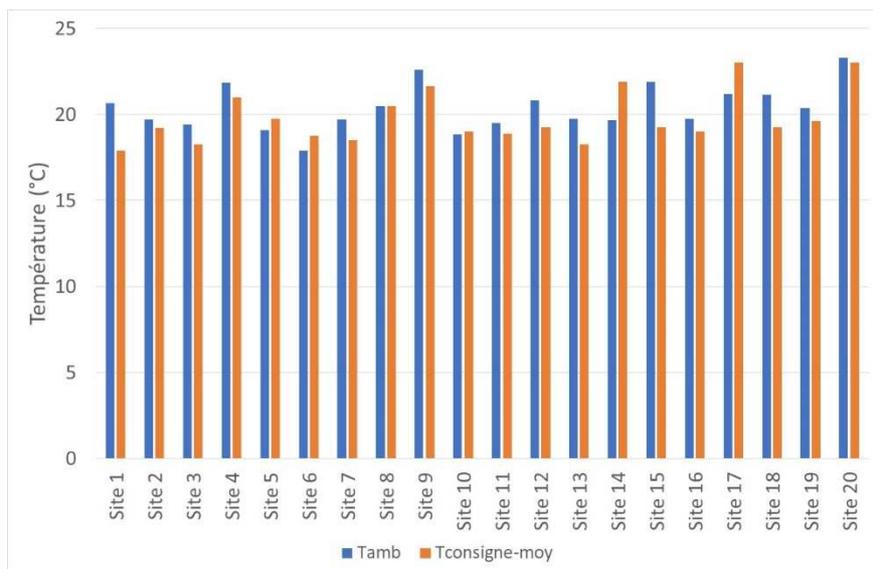


Figure 7 : comparaison entre la température ambiante moyenne mesurée et la température de consigne renseignée par le particulier.

Comme le montre cette figure, des écarts de moins de 1 °C sont constatés entre la température ambiante et la température de consigne, excepté pour les sites n° 1, 12, 14, 15, 17 et 18 où cet écart est de 3 °C au maximum.

Le *Tableau 9* regroupe les données liées au chauffage d'appoint et aux surfaces chauffées par le poêle (telles que déclarées par le particulier dans son questionnaire), ainsi que des données sur la surface des différentes zones du logement.

| | Utilisation d'un chauffage d'appoint (Relevés WIGWAM) | Surface de la zone Séjour (Relevés WIGWAM) | Surface de la zone Hors Séjour au RDC (Relevés WIGWAM) | Surface de la zone Hors Séjour à l'étage (Relevés WIGWAM) | Surface totale (Relevés WIGWAM) | Surface totale déclarée par le particulier | Surface chauffée par le poêle déclarée par le particulier | Ratio de surface chauffée par le poêle (déclarations du particulier) (%) | Position de la Pièce de Nuit 1 | Ratio Puissance installée / Surface chauffée (déclarations du particulier) (kW/m ²) |
|-----|---|--|--|---|---------------------------------|--|---|--|--------------------------------|---|
| | (-) | (m ²) | (m ²) | (m ²) | (m ²) | (m ²) | (m ²) | (%) | (-) | (kW/m ²) |
| C1 | non | - | - | - | - | 115 | 115 | 100% | R+1 | 0,07 |
| C2 | non | - | - | - | - | 120 | 120 | 100% | R+1 | 0,07 |
| C3 | non | - | - | - | - | 89 | 89 | 100% | R+1 | 0,09 |
| C4 | oui | 54 | 34 | 39 | 127 | 115 | 113 | 98% | RDC | 0,07 |
| C5 | non | - | - | - | - | 60 | 60 | 100% | R+1 | 0,13 |
| C6 | oui | 48 | 24 | 50 | 122 | 110 | 50 | 45% | R+1 | 0,16 |
| C7 | oui | 60 | 26 | 29 | 115 | 100 | 75 | 75% | RDC | 0,12 |
| C8 | oui | 65 | 18 | 75 | 157 | 130 | 130 | 100% | R+1 | 0,06 |
| C9 | oui | / | / | / | / | 175 | 70 | 40% | ??? | 0,10 |
| C10 | oui | 50 | 1 | 56 | 107 | 95 | 45 | 47% | R+1 | 0,18 |
| C11 | non | - | - | - | - | 143 | 143 | 100% | ??? | 0,06 |
| C12 | non | - | - | - | - | 124 | 124 | 100% | RDC | 0,06 |
| C13 | oui | 27 | 35 | 41 | 103 | 70 | 70 | 100% | R+1 | 0,13 |
| C14 | oui | 21 | 31 | 83 | 135 | 135 | 135 | 100% | RDC | 0,06 |
| C15 | oui | 37 | 47 | 24 | 109 | 80 | 60 | 75% | RDC | 0,13 |
| C16 | oui | 72 | 39 | 0 | 111 | 90 | 70 | 78% | ??? | 0,13 |
| C17 | non | - | - | - | - | 120 | 120 | 100% | R+1 | 0,08 |
| C18 | non | - | - | - | - | 88 | 88 | 100% | R+1 | 0,09 |
| C19 | oui (gaz) | 74 | 90 | 0 | 164 | 175 | 85 | 49% | RDC | 0,09 |
| C20 | non | - | - | - | - | 75 | 75 | 100% | RDC | 0,11 |

Tableau 9 : caractéristiques liées au chauffage d'appoint et aux surfaces chauffées par le poêle (telles que déclarées par le particulier dans son questionnaire).

Il apparaît dans ce tableau que la surface moyenne chauffée par le poêle à granulés (telle que déclarée par le particulier) varie de façon notable selon les sites (malgré une puissance nominale et un rendement moyens similaires pour les différents poêles installés, sur la période de chauffe). Ces surfaces moyennes chauffées varient de 45 m² au minimum à 143 m² au maximum, pour une moyenne à 90 m² et une médiane à 85 m². Ceci correspond à une puissance installée (sur la base de la puissance nominale du poêle à granulés) de 0,06 kW/m² à 0,18 kW/m² pour une moyenne à 0,10 kW/m². Un croisement des données recueillies dans les questionnaires avec ces éléments montre qu'il n'existe pas de relation particulière entre la surface chauffée (relativement à la surface totale du logement) et :

- Le mode de diffusion de la chaleur du poêle à granulés (par diffusion naturelle par convection ou par diffusion forcée par un ventilateur de soufflage) ;
- Le niveau d'isolation du logement tel que décrit par l'occupant.

Parallèlement, notons qu'il n'existe pas non plus de relation clairement établie entre l'utilisation d'un ventilateur de soufflage et le confort acoustique décrit par l'occupant.

Comme cela est décrit en annexe 1 de ce rapport, les premières analyses effectuées selon la méthodologie décrite dans le rapport métrologique pour évaluer la surface chauffée par le poêle par calcul montrent que cette méthodologie ne permet d'obtenir des données fiables. En effet, il ressort sur les évolutions temporelles des critères utilisés dans cette méthodologie, que le poêle contribue à une élévation de la température de « base » du logement (y compris la pièce de nuit) sans toutefois que cette élévation de température ne permette d'atteindre la température de consigne (de sorte que le chauffage d'appoint doit se déclencher quand même dans la pièce de nuit pour compenser cette différence). Or, comme indiqué dans les hypothèses de ces calculs décrites dans le rapport métrologique, il n'est pas possible d'évaluer l'influence du poêle dans ces conditions (en tous cas pas sans des travaux complémentaires plus approfondis).

Le *Tableau 10* fournit les résultats du calcul du ratio d'utilisation du poêle à granulés comparé au chauffage d'appoint, ainsi que du temps de sur-fonctionnement, d'inertie et de surchauffe du poêle à granulés selon la méthodologie décrite dans le rapport métrologique. Rappelons que le temps de surchauffe du poêle à granulés correspond au temps durant lequel la température du séjour dépasse la température de consigne (en mode automatique) ou la température de confort (en mode manuel). Ce temps se décompose en :

- Un temps de sur-fonctionnement du poêle à granulés, défini comme le temps durant lequel le poêle continue à fonctionner alors que la température du séjour est supérieure à la température de consigne. Cela se produit en particulier lorsque le thermostat du poêle se trouve (ponctuellement ou fréquemment) à un endroit dont la température est inférieure à la température moyenne dans le séjour ;
- Un temps d'inertie du poêle à granulés, défini comme le temps pendant lequel la température du séjour est supérieure à la température de consigne sans que l'apport de chaleur extérieure ne soit prédominant devant l'apport de chaleur du poêle à granulés, et ce alors que le poêle ne fonctionne pas.

| | Ratio d'utilisation du poêle à bois - %PAG | Temps de surfonctionnement du poêle | Temps d'inertie du poêle | Temps de surchauffe du poêle |
|------------|--|-------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | (%) | (jour) | (jour) | (jour) |
| C1 | 100% | 6 | 91 | 96 |
| C2 | 100% | 9 | 64 | 73 |
| C3 | 100% | 19 | 88 | 107 |
| C4 | 32% | 19 | 76 | 95 |
| C5 | 100% | 13 | 47 | 60 |
| C6 | 44% | 8 | 31 | 40 |
| C7 | 66% | 7 | 6 | 13 |
| C8 | 62% | 18 | 36 | 54 |
| C9 | 75% | 71 | 8 | 78 |
| C10 | 47% | 26 | 23 | 49 |
| C11 | 100% | 3 | 73 | 76 |
| C12 | 100% | 65 | 25 | 90 |
| C13 | 40% | 27 | 102 | 128 |
| C14 | 56% | 0 | 3 | 4 |
| C15 | 50% | 47 | 82 | 129 |
| C16 | 38% | 15 | 58 | 74 |
| C17 | 100% | 1 | 5 | 6 |
| C18 | 100% | 59 | 29 | 88 |
| C19 | 29% | 9 | 15 | 24 |
| C20 | 100% | 3 | 56 | 59 |

Tableau 10 : résultats de l'estimation du ratio d'utilisation du poêle à granulés, ainsi que du temps de sur-fonctionnement, d'inertie et de surchauffe du poêle à granulés.

Comme l'illustre la Figure 8, le temps d'inertie du poêle s'avère prédominant devant le temps de sur fonctionnement pour la plupart des sites exceptés les sites n° 7, 9, 10, 12 et 18. Ce graphique permet également de mettre en évidence de grande disparité de durée de sur-fonctionnement de l'appareil selon les sites, avec une valeur minimale de quatre jours pour le site n° 14, cent vingt-neuf jours pour le site n° 15, soixante-sept jours en moyenne et soixante-treize jours en médiane.

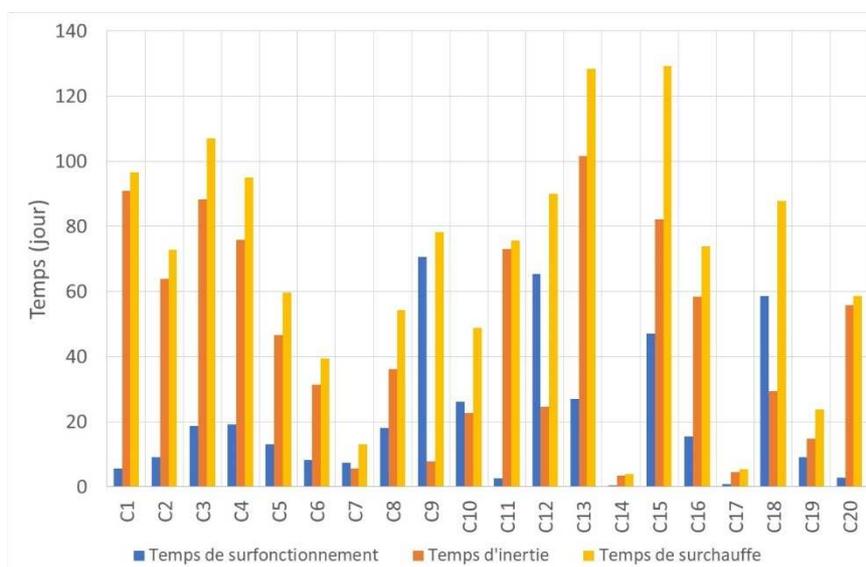


Figure 8 : comparaison entre le temps de sur fonctionnement, le temps d'inertie et le temps de surchauffe du poêle pour les différents sites, sur la période hivernale.

4.4.2. Sur la journée la plus froide et les journées typiques

Les dates des journées typiques et journées froides des vingt sites ont été choisies suivant la méthodologie précisée dans le rapport d'annexes chapitre 2. Un tableau de bord spécifique a été réalisé pour compiler l'ensemble des données sur ces journées précises.

En synthèse, voici ci-dessous, l'ensemble des moyennes des données mesurées sur les différents sites pour la journée la plus froide et les trois journées typiques.

| | Unités | Type de journées | Site 1 | Site 2 | Site 3 | Site 4 | Site 5 |
|---|--------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Consommation électrique du poêle | Wh/h | froide | 5,15 | 9,36 | 9,72 | 9,72 | 22,68 |
| | | typique | 4,00 | 5,40 | 6,84 | 7,20 | 11,88 |
| Température des fumées | °C | froide | 40,10 | 73,20 | 60,40 | 82,50 | 89,70 |
| | | typique | 27,80 | 39,60 | 42,60 | 57,10 | 46,10 |
| Pression de tirage du poêle | Pa | froide | 6,20 | Sans objet | Sans objet | Sans objet | 22,80 |
| | | typique | 3,40 | Sans objet | Sans objet | Sans objet | 13,60 |
| Température Extérieure | °C | froide | - 3,90 | - 3,60 | 2,10 | - 1,40 | - 0,40 |
| | | typique | 7,00 | 7,10 | 9,40 | 8,10 | 8,70 |
| | °C | froide | 20,90 | 18,20 | 20,50 | 21,70 | 18,30 |
| | | typique | 21,50 | 19,20 | 20,30 | 22,20 | 17,80 |
| | °C | froide | 18,30 | 20,50 | 17,50 | 22,00 | 15,10 |
| | | typique | 20,80 | 20,30 | 18,10 | 22,70 | 15,90 |
| | °C | froide | 16,20 | 19,40 | 17,80 | 22,40 | 16,30 |
| | | typique | 19,30 | 19,90 | 18,10 | 22,30 | 17,00 |
| | °C | froide | 19,30 | 16,60 | 17,80 | 21,60 | 15,20 |
| | | typique | 20,40 | 19,00 | 18,80 | 21,30 | 16,80 |
| | °C | froide | 18,30 | 16,00 | 12,80 | 20,20 | Sans objet |
| | | typique | 19,70 | 17,90 | 17,80 | 21,10 | Sans objet |
| | °C | froide | Sans objet | Sans objet | Sans objet | 39,40 | 15,50 |
| | | typique | Sans objet | Sans objet | Sans objet | 31,10 | 16,90 |

| | | Unités | Type de journées | Site 6 | Site 7 | Site 8 | Site 9 | Site 10 |
|---|------|---------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Consommation électrique du poêle | Wh/h | froide | | 28,94 | 26,71 | 35,35 | 42,84 | 16,38 |
| | | typique | | 22,25 | 23,44 | 28,40 | 39,96 | 13,18 |
| Température des fumées | °C | froide | | 85,60 | 62,40 | 103,50 | 114,50 | 52,80 |
| | | typique | | 52,60 | 47,80 | 89,90 | 100,80 | 41,10 |
| Pression de tirage du poêle | Pa | froide | | 38,30 | Sans objet | Sans objet | Sans objet | Sans objet |
| | | typique | | 24,40 | Sans objet | Sans objet | Sans objet | Sans objet |
| Température Extérieure | °C | froide | | 0,70 | - 5,70 | - 6,00 | - 1,90 | - 4,50 |
| | | typique | | 8,60 | 6,10 | 5,50 | 8,30 | 7,00 |
| <i>Ambiante dans la pièce de vie 1 (PdV 1)</i> | °C | froide | | 17,40 | 18,80 | 23,70 | 21,50 | 17,80 |
| | | typique | | 18,40 | 20,00 | 23,90 | 22,30 | 18,70 |
| <i>Ambiante dans la pièce de vie 2 (PdV 2)</i> | °C | froide | | 18,00 | 18,00 | 19,70 | 19,80 | 15,90 |
| | | typique | | 18,80 | 19,50 | 20,90 | 21,80 | 17,70 |
| <i>Ambiante dans la pièce de vie 3 (PdV 3)</i> | °C | froide | | 16,40 | 19,40 | 12,70 | 19,70 | 18,20 |
| | | typique | | 17,90 | 20,70 | 17,70 | 21,20 | 18,90 |
| <i>Ambiante dans la pièce de nuit 1 (PdN 1)</i> | °C | froide | | 18,80 | 14,30 | 14,30 | 14,80 | 17,00 |
| | | typique | | 20,50 | 16,20 | 18,40 | 17,10 | 18,10 |
| <i>Ambiante dans la pièce de nuit 2 (PdN 2)</i> | °C | froide | | Sans objet | 17,50 | 21,00 | 14,30 | 19,50 |
| | | typique | | Sans objet | 19,20 | 21,00 | 19,10 | 18,30 |
| <i>Chauffage pièce de nuit1 (PdN1 Chauff.)</i> | °C | froide | | 35,10 | 14,60 | 17,50 | 17,70 | 17,00 |
| | | typique | | 27,90 | 16,20 | 18,80 | 18,10 | 18,70 |

| | | Unités | Type de journées | Site 11 | Site 12 | Site 13 | Site 14 | Site 15 |
|---|------|---------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Consommation électrique du poêle | Wh/h | froide | | 16,13 | 86,04 | 30,96 | 32,04 | 15,12 |
| | | typique | | 12,02 | 70,92 | 19,80 | 28,08 | 13,68 |
| Température des fumées | °C | froide | | 42,20 | 98,00 | 74,90 | 84,30 | 110,40 |
| | | typique | | 34,70 | 74,30 | 50,70 | 59,40 | 82,20 |
| Pression de tirage du poêle | Pa | froide | | 10,80 | 15,70 | Sans objet | Sans objet | 7,70 |
| | | typique | | 7,40 | 4,50 | Sans objet | Sans objet | 5,10 |
| Température Extérieure | °C | froide | | - 0,60 | - 0,40 | - 2,30 | - 4,50 | 0,20 |
| | | typique | | 8,20 | 7,70 | 7,50 | 7,00 | 9,60 |
| <i>Ambiante dans la pièce de vie 1 (PdV 1)</i> | °C | froide | | 18,00 | 20,90 | 18,40 | 18,50 | 23,30 |
| | | typique | | 19,30 | 20,90 | 18,80 | 19,50 | 23,20 |
| <i>Ambiante dans la pièce de vie 2 (PdV 2)</i> | °C | froide | | 17,70 | 20,20 | 20,40 | 18,50 | 23,20 |
| | | typique | | 18,70 | 20,40 | 19,90 | 19,50 | 22,60 |
| <i>Ambiante dans la pièce de vie 3 (PdV 3)</i> | °C | froide | | 17,60 | 19,50 | 18,20 | 18,70 | 21,40 |
| | | typique | | 19,30 | 20,00 | 19,10 | 20,10 | 21,90 |
| <i>Ambiante dans la pièce de nuit 1 (PdN 1)</i> | °C | froide | | 15,50 | 18,10 | 15,60 | 17,20 | 18,00 |
| | | typique | | 19,40 | 19,10 | 17,20 | 18,80 | 19,00 |
| <i>Ambiante dans la pièce de nuit 2 (PdN 2)</i> | °C | froide | | Sans objet | 18,40 | 18,20 | 19,40 | Sans objet |
| | | typique | | Sans objet | 19,40 | 18,40 | 19,10 | Sans objet |
| <i>Chauffage pièce de nuit1 (PdN1 Chauff.)</i> | °C | froide | | Sans objet | Sans objet | Sans objet | 30,20 | 17,60 |
| | | typique | | Sans objet | Sans objet | Sans objet | 30,40 | 18,70 |

| | Unités | Type de journées | Site 16 | Site 17 | Site 18 | Site 19 | Site 20 |
|---|--------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Consommation électrique du poêle | Wh/h | froide | 9,72 | 28,08 | 27,86 | 6,41 | 9,72 |
| | | typique | 9,00 | 19,87 | 18,54 | 5,58 | 8,71 |
| Température des fumées | °C | froide | 61,70 | 72,50 | 93,00 | 61,70 | 71,50 |
| | | typique | 50,20 | 50,00 | 48,70 | 42,50 | 48,40 |
| Pression de tirage du poêle | Pa | froide | Sans objet | 7,30 | Sans objet | Sans objet | Sans objet |
| | | typique | Sans objet | 4,40 | Sans objet | Sans objet | Sans objet |
| Température Extérieure | °C | froide | - 1,50 | 2,90 | - 0,80 | - 1,40 | 1,20 |
| | | typique | 6,80 | 11,90 | 7,60 | 8,60 | 9,40 |
| | °C | froide | 19,20 | 18,90 | 22,40 | 18,90 | 22,50 |
| | | typique | 20,60 | 20,70 | 21,50 | 19,70 | 22,90 |
| | °C | froide | 18,10 | 18,80 | 20,10 | 20,00 | 23,00 |
| | | typique | 20,10 | 21,00 | 20,60 | 20,60 | 23,90 |
| | °C | froide | 22,80 | 18,20 | 21,80 | 19,40 | 23,00 |
| | | typique | 24,00 | 20,30 | 20,60 | 20,10 | 23,70 |
| | °C | froide | 16,00 | 16,20 | 22,40 | 16,10 | 18,70 |
| | | typique | 18,60 | 18,40 | 21,30 | 17,20 | 21,20 |
| | °C | froide | 9,10 | 15,90 | 21,90 | 18,70 | 21,90 |
| | | typique | 21,90 | 18,70 | 21,50 | 19,70 | 21,90 |
| | °C | froide | 20,10 | Sans objet | 22,40 | 21,80 | 17,40 |
| | | typique | 21,60 | Sans objet | 21,70 | 20,00 | 20,50 |

Tableau 11 : moyennes des données mesurées sur les différents sites pour la journée la plus froide et les trois journées typiques.

Ces données font apparaitre d'importants écarts de consommation électrique selon les sites, avec :

- Une consommation minimale de 5 Wh/h pour le site n° 1 et une consommation maximale de 86 Wh/h pour le site n° 12 (ou 43 Wh/h pour le site n° 9, en excluant le site n° 12), pour une moyenne à 23 Wh/h et une médiane à 20 Wh/h, lors de la journée la plus froide ;
- Une consommation minimale de 4 Wh/h pour le site n°1 et une consommation maximale de 71 Wh/h pour le site n° 12 (ou 40 Wh/h pour le site n° 9, en excluant le site n° 12), pour une moyenne à 18 Wh/h et une médiane à 13 Wh/h, lors des 3 journées typiques (moyenne).

La Figure 9 permet de visualiser les données de consommation électrique, température des fumées, température extérieure et température du capteur PdV1 (situé le plus proche possible du thermostat du poêle), respectivement pour la journée la plus froide et la moyenne des trois journées typiques.

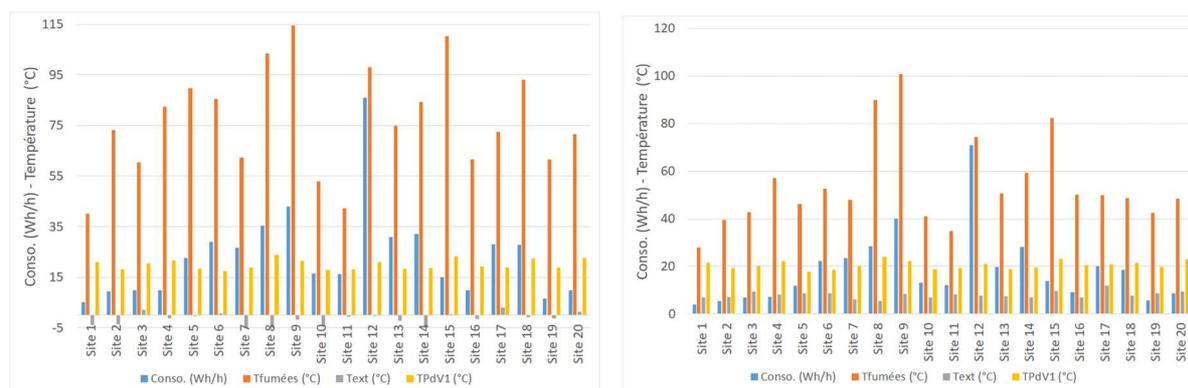


Figure 9 : représentation graphique de certaines données moyennes pour la journée la plus froide (à gauche) et les trois journées typiques (à droite).

Comme évoqué précédemment, il se peut que les valeurs de consommation électrique élevées mesurées sur le site n° 12 soient à mettre en relation avec la spécificité de ce site (conduit concentrique remplacé par un conduit simple paroi lors des mesures).

Comme le laissent apparaître ces histogrammes, une certaine corrélation semble se dessiner entre la consommation électrique du poêle et la température des fumées, tandis que la consommation semble décorrélée de la température extérieure et de la température du capteur PdV1. Cette tendance est confirmée par la Figure 10 pour la moyenne des trois journées typiques, pour laquelle une relation linéaire peut être établie entre la consommation électrique du poêle et la température des fumées (en considérant l'ensemble des sites, excepté le site n° 12), avec un facteur de corrélation (R^2) relativement faible, de 0,53.

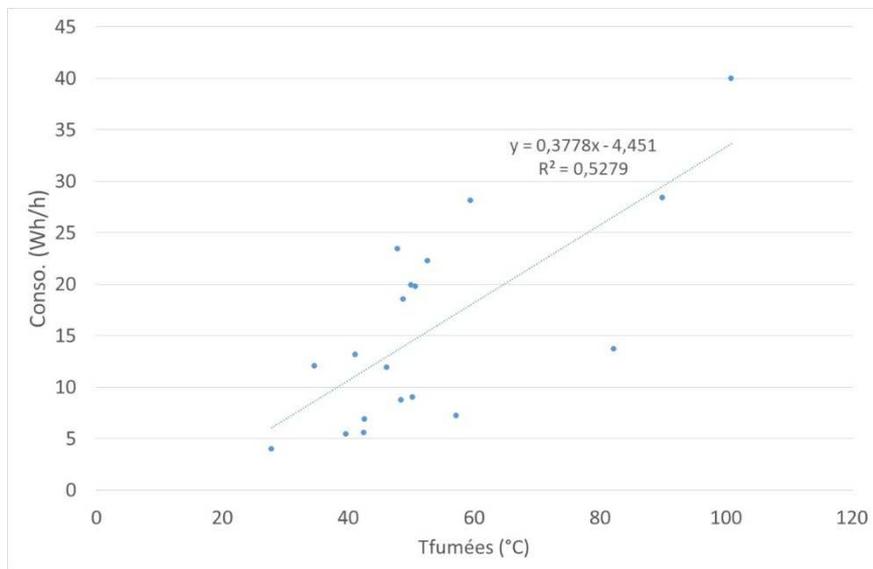


Figure 10 : représentation de la consommation électrique en fonction de la température des fumées pour la moyenne des trois journées typiques, en considérant l'ensemble des sites, excepté le site n° 12.

Par croisement avec les résultats du chapitre 4 (Figure 4 : consommation électrique en fonction de la durée de fonctionnement du poêle, en considérant l'ensemble des sites, excepté le site 12.), il apparaît donc que la consommation électrique du poêle dépend *a minima*, conjointement, de la durée de fonctionnement et de la température des fumées du poêle.

En outre, ainsi que le montre la Figure 11, des tendances similaires sont observées d'un site à l'autre entre la journée la plus froide et la moyenne des trois journées typiques, en particulier en termes de consommation électrique, de sorte que le site le plus consommateur en énergie sur la moyenne des trois journées typiques l'est également pour la journée la plus froide, et de même pour le site le moins énergivore. Cette tendance est légèrement moins marquée pour la température des fumées.

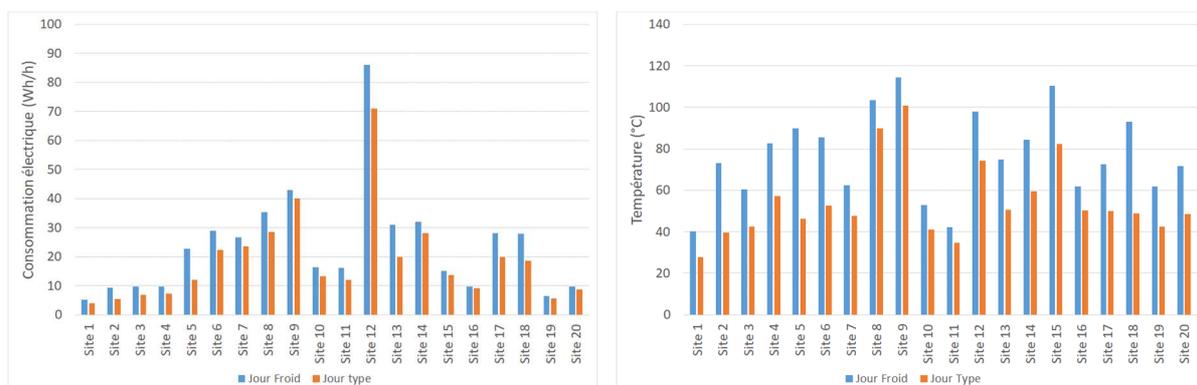


Figure 11 : comparaison de la consommation électrique (à gauche) et de température des fumées (à droite) pour chacun des sites, entre la journée la plus froide et la moyenne des trois journées typiques.

5. Campagne de mesures des émissions de polluants : mesures ponctuelles

Les instruments nécessaires à la caractérisation des émissions de polluants nécessitent d'être positionnés à proximité des poêles à granulés. L'accessibilité limitée des conduits de ces appareils, installés dans la pièce de vie ainsi que la réalisation des essais en présence des occupants du logement a nécessité, par rapport à des essais menés en laboratoire, d'adapter le matériel utilisé pour la caractérisation des émissions. Le choix s'est notamment orienté vers des instruments de mesure transportables et relativement silencieux.



Instrumentation mise en place chez les particuliers.

5.1. Difficultés rencontrées

Les mesures réalisées ponctuellement chez les particuliers, prévues dans le cadre du présent marché, nécessitent la présence de deux techniciens sur site pendant deux créneaux continus de 10h *a minima* dans les vingt logements répartis sur l'ensemble du territoire national (renvoyer à la figure avec les sites). Ces mesures devaient initialement être réalisées durant la saison de chauffe 2020-2021. Du fait du contexte pandémique de cette période et pour éviter de contribuer à la propagation du virus, la campagne d'essais sur site a été repoussée d'une année. Ces essais n'ont donc pas pu être réalisés sur la même saison de chauffe que les mesures en continu décrites au chapitre 4.

Toutes les mesures ont pu être réalisées de novembre 2021 à fin mars 2022, malgré les perturbations persistantes liées au Covid 19 durant cette période, à l'exception de celles prévues sur le site n° 9, le particulier ayant déménagé entre temps. Pour pallier ce manque, des mesures complémentaires ont été effectuées sur un autre site (C11) en utilisant le protocole « BeReal » avec les granulés résineux et feuillus et le protocole « conditions de fonctionnement réelles simulées » avec des granulés résineux.

5.2. Déroulement des essais

Préalablement à l'intervention, chaque particulier a été contacté afin de planifier la réalisation des mesures. Les interventions sur site ont été menées par l'Ineris. Elles se sont déroulées de début novembre 2021 à fin mars 2022.

Chaque intervention a été menée selon le planning suivant :

- Jour 1 : déplacement, installation des instruments de mesure sur le conduit de fumées, prise en main du poêle à granulés ;
- Jour 2 : mesure selon le protocole BeReal, avec des granulés résineux ;
- Jour 3 : mesure selon le protocole BeReal, avec des granulés feuillus **ou** dans des conditions de fonctionnement réelles simulées avec des granulés résineux ;
- Jour 4 : dépose des instruments de mesure et retour.

Ces mesures ont été effectuées selon un protocole opératoire bien défini, de façon à s'assurer du fonctionnement des poêles à granulés lors de la période de mesure et à comparer les résultats obtenus entre eux.

5.3. Protocoles de test utilisés

Durant la première journée d'essais, les essais ont été effectués selon le protocole BeReal avec des granulés résineux à différentes allures (sur les appareils à granulés, l'allure est en étroite relation avec le débit de granulés introduits dans la chambre de combustion et le débit d'air extrait) :

- Nominale (sélection du niveau de puissance le plus élevé de l'appareil) ;
- Réduite, plus petite allure de fonctionnement de l'appareil correspondant en général à 30 % de la puissance nominale (sélection du niveau de puissance le plus faible) ;
- Intermédiaire (sélection du niveau de puissance intermédiaire).

Le protocole BeReal⁶ consiste à effectuer des mesures durant quatre allures distinctes selon le programme décrit dans le *Tableau 12* :

| Phase | Opération | Allure | Durée (mn) |
|-------|---------------------|----------------------------|------------|
| 1a | Allumage à froid | Nominale | 50 |
| 1b | Changement d'allure | Réduite | 90 |
| S1 | Arrêt | | 40 |
| 2 | Démarrage à chaud | Nominale | 50 |
| S2 | Arrêt | | 40 |
| 3 | Démarrage à chaud | Intermédiaire ¹ | 180 |

¹ Intermédiaire : allure moyenne entre les allures nominale et réduite

Tableau 12 : protocole BeReal.

⁶ BeReal est le nom d'un projet R&D européen (www.bereal-project.eu)

Durant **la seconde journée d'essai**, les essais ont été menés soit :

- Selon le protocole BeReal (*Tableau 12*), avec des granulés feuillus (sur huit sites) ;
- Dans des conditions de fonctionnement réelles simulées avec des granulés résineux (sur onze sites).

Les conditions de fonctionnement réelles simulées testées ont été les suivantes :

- Essais en mode automatique en n'intervenant que sur la température de consigne (avec les réglages initiaux de l'appareil) ;
- Essais en mode modulation en intervenant sur la température de consigne et le niveau de puissance de l'appareil (des essais à plusieurs niveaux de puissance ont été effectués) avec des cycles d'environ 1 heure (temps de chauffe de 30 mn, allure réduite de 30 mn environ) : après atteinte de la température de consigne, le poêle bascule en mode « modulation » (passage à faible niveau de puissance afin d'éviter l'extinction) ;
- Essais en mode manuel avec des cycles d'allumage / extinction du poêle d'environ 1 heure (temps de chauffe de 30 mn, arrêt de 30 mn) : après atteinte de la température souhaitée, le poêle est arrêté. Des essais ont été effectués en réglant le poêle à plusieurs niveaux de puissance.

5.4. Mesures effectuées

Lors de chaque campagne d'essais, les mesures suivantes ont été effectuées en continu (sauf mention contraire) :

- Mesures physiques :
 - o Température ambiante ;
 - o Température des fumées ;
 - o Humidité des fumées (non continu, une mesure réalisée durant l'allure intermédiaire) ;
 - o Teneur en O₂ ;
 - o Tirage ;
 - o Consommation en combustible (non continu, une mesure par journée d'essai) ;
- Mesures des polluants :
 - o Teneur en CO ;
 - o Teneur en CO₂ ;
 - o Teneur en NO_x ;
 - o Teneur en Particules (fraction solide uniquement, estimée à partir d'une corrélation établie entre la méthode de mesure automatique (PPS) et la méthode de référence sur filtre chauffé (cf. rapport d'annexes)).

En raison de la légèreté et de la faible quantité des cendres produites, celles-ci n'ont pas pu être récupérées de manière quantitative, il n'a donc pas été possible de déterminer un taux de cendres fiable.

Les mesures ont été effectuées à environ 1 m après la buse de sortie des poêles à granulés, en remplaçant un tronçon de conduit existant par un tronçon de mesure équipé des perçages nécessaires à la réalisation des prélèvements et mesures souhaitées.

Les méthodes de mesure utilisées sont présentées dans le rapport d'annexes (chapitre 3).

Par ailleurs, une valeur journalière de la consommation en granulés est déterminée durant chaque journée d'essai, par différence de pesée (vidage complet puis remplissage de la trémie du poêle avec 10 kg de granulés le matin et vidage complet de la trémie, récupération et pesée des granulés restants le soir). La quantité de granulés consommée lors de chaque essai est calculée à partir de la quantité de granulés consommée durant la journée d'essai au prorata du temps et de la puissance de fonctionnement de l'appareil lors de chaque essai. Rappelons que cette donnée est nécessaire afin de déterminer la puissance et le rendement de l'appareil (sur la base de la norme NF EN 14785 - 2006) ainsi que le débit de fumées

(sur la base de la norme NF EN 16510-1 - 2018) nécessaire au calcul des facteurs d'émission en polluants. Tous ces paramètres sont établis pour chaque allure de fonctionnement testée.

5.5. Expression des résultats de mesures

Les concentrations massiques de CO, NO_x et particules (PM) sont exprimées aux conditions normales de température et de pression (273 K et 101,3 kPa) sur gaz sec, et sont corrigées à une concentration d'oxygène de référence de 13%. Les concentrations sont données en milligrammes par mètre cube.

Les NO_x analysés sont le NO (monoxyde d'azote) et le NO₂ (dioxyde d'azote), les teneurs sont données en équivalents NO₂.

Les concentrations volumiques d'O₂ et de CO₂ sont données en % volume sec.

Les facteurs d'émission sont calculés à partir des teneurs en polluants mesurées, des débits de fumées (gaz sec), des débits de granulés et du PCI de granulés. Ils sont exprimés en g/GJ d'énergie entrante ou sortante en prenant en compte les rendements établis pour chaque allure de fonctionnement testées.

5.6. Récapitulatif des paramètres déterminés lors des essais ponctuels

Les paramètres déterminés à partir des résultats de mesures réalisées ponctuellement chez les particuliers sont récapitulés dans le *Tableau 13*. Ces paramètres, ainsi que les concentrations et les facteurs d'émission sont déterminés par calcul de leur moyenne, lors de chaque essai pour chaque site et allure de fonctionnement de l'appareil.

| Installation | | | |
|--|---|---|---|
| Tirage (Pz) | Consommation de granulés | Température ambiante (°C) | |
| Puissance | Rendement énergétique | Efficacité énergétique saisonnière | |
| Emissions à l'atmosphère | | | |
| O ₂ et CO ₂ en % | CO en mg/m ³ sec à 13% d'O ₂ CO en g/GJ d'énergie entrante et sortante | NO _x en mg/m ³ sec à 13% d'O ₂ NO _x en g/GJ d'énergie entrante et sortante | Particules en mg/m ³ sec à 13% d'O ₂ Particules en g/GJ d'énergie entrante et sortante |
| Température des fumées en °C | Humidité des fumées en % | | |

Tableau 13 : récapitulatif des paramètres obtenus lors des mesures ponctuelles.

5.7. Résultats des mesures à l'émission

5.7.1. Informations préliminaires

Il n'a pas été procédé à un réglage spécifique des poêles préalablement à la réalisation des essais. Les poêles sont pour la plupart réglés à une puissance intermédiaire (P3). Les appareils retenus selon les critères de sélection de l'étude, sont assez récents (trois ont moins de cinq ans, dix-sept moins de trois ans) et pour certains encore sous garantie. Ils font tous l'objet d'un entretien annuel. Tous les appareils ont été utilisés *a minima* durant une saison de chauffe complète avant notre intervention.

Tous les appareils testés ont fait l'objet d'un ramonage durant la période estivale avant remise en fonctionnement des poêles pour la saison de chauffe 2021-2022 à l'exception d'un appareil (site n° 17) où, lors de notre intervention, le ramonage n'avait pas été effectué depuis plus de 18 mois (l'appareil étant par ailleurs bien entretenu).

Les conditions météorologiques extérieures n'ont *a priori* pas eu d'impact majeur sur le fonctionnement des appareils lors des campagnes d'essais à l'exception des essais menés sur le site n° 17. Ces derniers ont été réalisés avec de forts vents extérieurs qui ont eu un impact important sur le tirage de l'installation (tirage mesuré compris entre -19 et -30 Pa lors des essais, valeurs les plus élevées mesurées sur l'ensemble des sites).

Pour le site n° 17, la survenue de phénomènes concomitants (ramonage non effectué depuis dix-huit mois et vents violents) semble avoir particulièrement affecté les résultats obtenus, sans malheureusement qu'il ne soit possible d'identifier clairement l'impact de chacun de ces phénomènes sur le fonctionnement et sur les performances environnementales et énergétiques de l'appareil. Les émissions de CO et particules solides (PM) sont particulièrement fortes sur ce site, quelle que soit l'allure de fonctionnement de l'appareil.

Sur le site n° 18, un fort encrassement de l'appareil, provenant d'un bouchage de l'arrivée d'air extérieur par des gravats liés à la réalisation de travaux, a été constaté avant la réalisation des mesures. Cette obturation de l'arrivée d'air a conduit à un important dysfonctionnement du poêle avant l'intervention aux fins de la présente étude, avec notamment une forte production d'imbrûlés (la présence visible de suies en quantité importante en atteste). Les mesures ont été effectuées uniquement après débouchage du conduit d'arrivée d'air. Elles ne semblent pas avoir été affectées par le fort encrassement du poêle.

L'appareil du site n° 12 était équipé d'un conduit concentrique. Pour la réalisation des mesures, le conduit de raccordement a été démonté et remplacé par un conduit classique, la prise d'air se situant alors dans le logement. L'impact de cette modification de l'installation sur les résultats obtenus est méconnu.

5.7.2. Conformité des installations

Les techniciens de l'Ineris ont, préalablement à la réalisation des essais chez les particuliers, suivi une formation « Fumisterie » afin de pouvoir intervenir sur les conduits de raccordement et détecter les éventuelles anomalies des installations lors de leurs interventions.

Aucune non-conformité majeure visible n'a été relevée sur l'ensemble des sites. Rappelons que, pour la réalisation de l'étude, seuls des sites identifiés comme conformes aux règles de mises en œuvre d'un poêle à granulés ont été sélectionnés (sélection effectuée sur dossier, sans visite préalable). Notons toutefois que plusieurs points de vérification n'ont pas pu être réalisés (car non visibles ou par faute d'informations disponibles). C'est le cas en particulier pour la distance du conduit et de l'appareil par rapport au(x) mur(s) adjacent(s), qui suppose de connaître la composition précise de ce(s) mur(s) pour s'assurer qu'il(s) est(sont) entièrement non-combustible(s) quand les distances minimales par rapport aux matériaux combustibles fixées dans le DTU 24.1 (pour les conduits) ou dans la notice / sur la plaque signalétique des poêles (pour les appareils) ne sont pas respectées.

Il n'a pas non plus été observé de problème de condensation dans les conduits (pas d'égouttures visibles lors du démontage des conduits, pas d'écoulements constatés par les particuliers).

5.7.3. Phases de combustion et émissions de polluants

Le cycle de combustion d'un poêle à granulés comprend les phases suivantes :

- L'allumage : d'une durée comprise entre 5 et 10 mn selon les appareils, cette phase consiste à allumer la charge de granulés introduite dans le creuset de l'appareil au moyen d'une bougie d'allumage (la durée d'allumage est notamment fonction du type de bougie utilisée (métallique ou céramique) et de la détérioration de ses performances au fil du temps) ;
- La combustion : elle se déroule à un niveau de puissance, généralement préréglé par l'installateur. La plupart des appareils disposent de cinq niveaux de puissance, noté P1 à P5 (pour les sites retenus, un seul appareil disposait de dix niveaux de puissance). Plus le niveau de puissance est élevé, plus la charge en combustible nécessaire à la combustion est élevée. Les poêles à granulés disposent d'un ventilateur dit « d'extraction » situé en aval de la chambre de combustion, permettant à la fois d'extraire les fumées et d'aspirer l'air nécessaire à la combustion. La vitesse de rotation de ce ventilateur est généralement d'autant plus élevée que la charge en combustible introduite dans la chambre de combustion est importante. Après allumage et/ou après un changement de niveau de puissance, l'appareil passe par un régime transitoire de combustion (le temps que la température des fumées se stabilise), qui dure généralement de 20 à 30 minutes ;
- L'extinction : avant de s'éteindre, l'appareil termine la combustion des granulés présents dans le conduit, en accélérant le processus de combustion et en augmentant fortement la vitesse de rotation du ventilateur d'extraction (donc avec de forts excès d'air). Cette opération s'avère nécessaire afin de parfaire le rallumage suivant. Cette phase dure généralement de 5 à 10 mn.

Les émissions de CO et particules solides (PM) évoluent durant ces différentes phases (cf. Figure 13 et Figure 14) :

- Les émissions de CO et particules solides (PM) augmentent lors de chaque allumage de l'appareil ;
- Les émissions lors d'un allumage à froid de l'appareil (premier essai de la journée) ne sont pas plus élevées que lors d'un allumage à chaud (essai effectué en milieu de journée) ;
- Les émissions lors d'un allumage effectué à puissance intermédiaire (P3 – essai effectué en début d'après-midi) ne sont pas plus élevées que celles lors d'un allumage à puissance nominale (P5) ;
- Les émissions de CO augmentent fortement lors de chaque arrêt de l'appareil tandis que les émissions de particules solides n'évoluent pas. Une augmentation de la fraction condensable (non mesurée dans le cadre de la présente étude) n'est toutefois pas exclue durant cette phase ;
- Plus l'allure est réduite, moins les émissions de CO sont stables (du fait d'un laps de temps plus important entre deux alimentations du creuset en granulés) ;
- A allure intermédiaire notamment, des pics de CO sont observés à une fréquence régulière.

Certains appareils sont équipés d'un réglage manuel permettant de tenir compte de la qualité du combustible :

- Avec de fréquents et réguliers nettoyages du creuset (au moyen d'un apport d'air supplémentaire durant quelques minutes) lorsque la qualité du combustible est médiocre,
- Avec des nettoyages du creuset lors de l'extinction de l'appareil seulement lorsque le combustible est de bonne qualité,
- Sans nettoyage du creuset lorsque les granulés sont d'excellente qualité.

Ces différentes configurations ont été rencontrées lors de nos essais.

Notons, par ailleurs, qu'il existe des appareils haut de gamme, équipés d'un nettoyage mécanique du creuset. Outre le fait de faciliter le rallumage du poêle, ce dispositif devrait permettre d'éviter le pic d'émission de polluants lors de l'extinction de l'appareil. Aucun dispositif de ce type n'a été mis en évidence lors de nos essais.

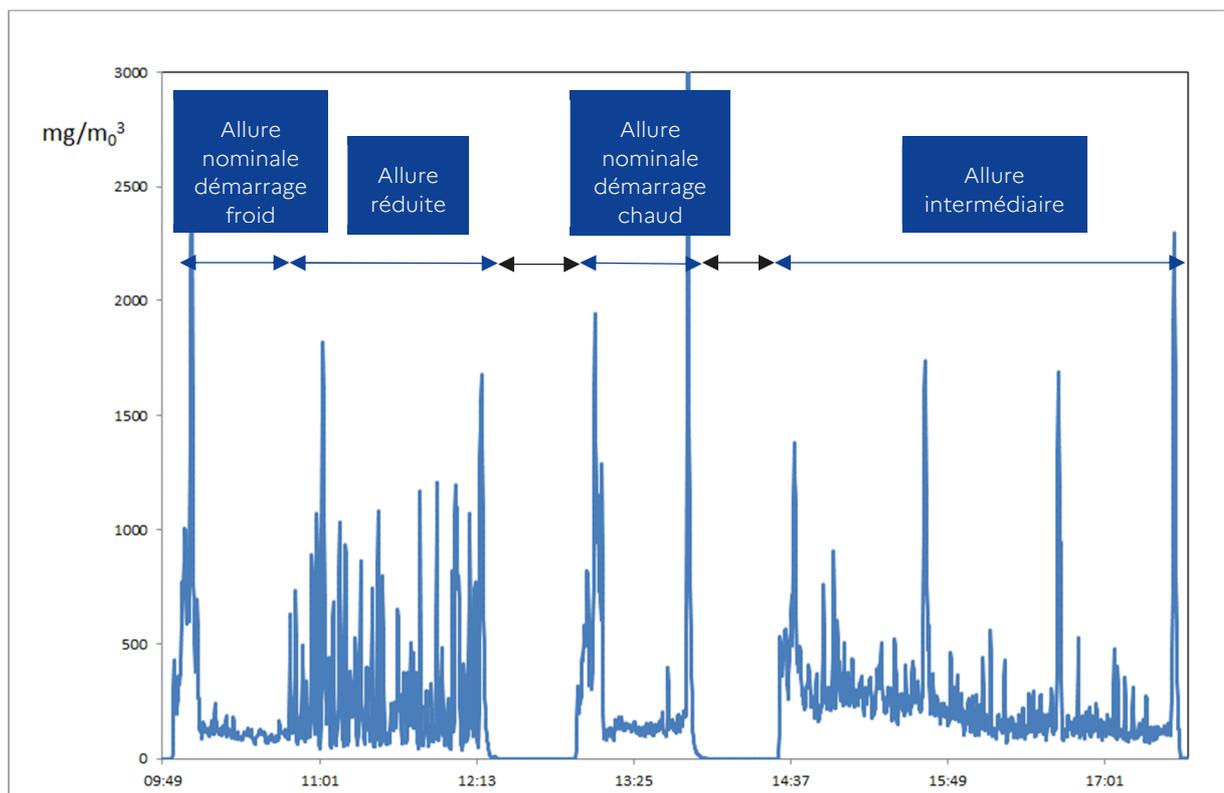


Figure 12 : exemple d'évolution des émissions de CO (valeurs brutes non ramenées à une teneur en O₂ de référence) au cours d'une journée d'essais (protocole BeReal, C1, journée 1). Les faibles émissions constatées à allure réduite (10h40-12h10) sont liées à la forte dilution des fumées à cette allure.

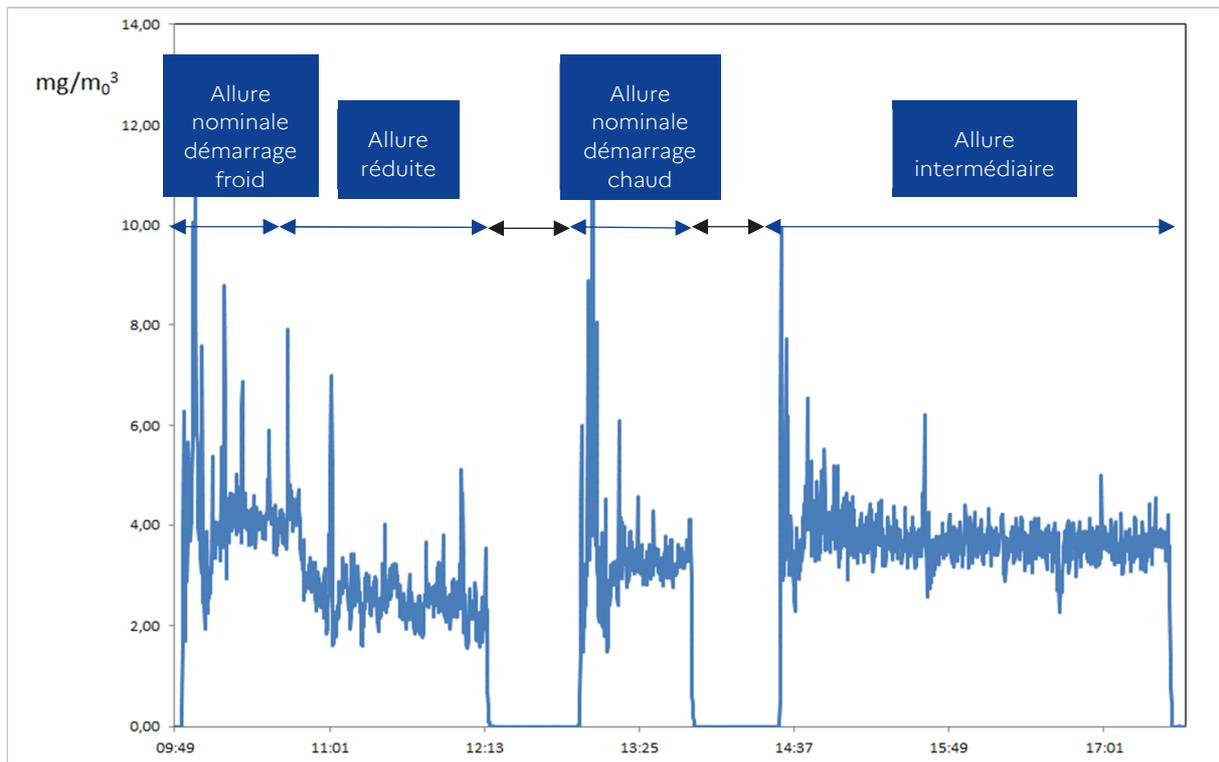


Figure 13 : exemple d'évolution des émissions de particules solides (valeurs brutes non ramenées à une teneur en O₂ de référence, avant application de la corrélation) au cours d'une journée d'essais (protocole BeReal, C1, journée 1). Les faibles émissions constatées à allure réduite (10h40-12h10) sont liées à la forte dilution des fumées à cette allure.

5.7.4. Modes de fonctionnement

L'opérateur peut utiliser son poêle en marche manuelle, en allumant et en éteignant son poêle quand il le souhaite, ou en marche automatique, sans intervention. L'opérateur règle alors uniquement le niveau de puissance de l'appareil et programme la température de consigne.

En marche automatique, un poêle à granulés peut fonctionner de différentes manières :

- En mode modulation : lorsque la température de consigne est atteinte, le poêle continue à fonctionner mais à une puissance réduite. Dans ce cas, la bougie d'allumage est peu sollicitée. Ce mode de fonctionnement peut conduire à une légère surchauffe du logement, le poêle finit toutefois par s'éteindre si l'écart entre la température ambiante et la température de consigne dépasse une certaine valeur (fixée par le fabricant). L'inconvénient de ce mode de fonctionnement est la dégradation des performances de l'appareil, notamment en termes de rendement et d'émission de polluants, lorsque ce dernier fonctionne trop longtemps à faible puissance ;
- En mode marche/arrêt : lorsque la température de consigne est atteinte, le poêle s'éteint. Il redémarre lorsque l'écart entre la température ambiante mesurée et la température de consigne est significatif. Ce mode de fonctionnement conduit indéniablement à une sollicitation forte de la bougie d'allumage, qui doit rallumer régulièrement la charge de granulés et donc à une usure plus rapide de cette dernière. Par ailleurs, l'augmentation du nombre d'allumage et d'extinction peut conduire à un accroissement des émissions de polluants, (rappelons qu'un cycle de nettoyage du creuset, générant un pic d'émission de polluants, est habituellement lancé lors de l'extinction du poêle).

Tous les appareils testés sont susceptibles de fonctionner en mode modulation. Toutefois, deux appareils (sites n° 4 et 13) ont été, lors de leur installation, reliés à des thermostats externes qui ne sont pas compatibles avec une marche en mode modulation des appareils. Ceux-ci fonctionnent alors en mode marche/arrêt en fonction de la température de consigne enregistrée. Les autres appareils sont reliés à des thermostats de la marque, fixes (positionnés à l'arrière de l'appareil) ou pouvant être déportés (filaire ou via une connexion wifi).

5.7.5. Origine des polluants et paramètres influents

Du fait d'une réaction incomplète, la combustion du bois (bûches ou granulés) émet un grand nombre de polluants gazeux et particulaires tels que CO, NO_x, PM, COV (composés organiques volatils), HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), etc.

Seules des mesures de CO, NO_x et PM ont été effectuées dans le cadre de la présente étude ; une mesure des autres polluants était difficilement envisageable chez un particulier en raison de la complexité des méthodes de mesure à mettre en œuvre.

5.7.5.1. Emissions de CO

Le CO est un gaz issu d'une combustion insuffisamment maîtrisée, c'est donc un bon indicateur de la qualité de la combustion. Ces émissions sont étroitement liées à la quantité d'air introduite (ou excès d'air par rapport à la quantité d'air théorique nécessaire) et à la bonne qualité du mélange air / gaz combustible ce qui suppose de distribuer judicieusement l'air dans la chambre de combustion. Afin de minimiser la formation de ce polluant une quantité d'air comburant optimale doit être apportée :

- Un trop faible excès d'air engendre, par manque d'air, une augmentation des imbrûlés, si la qualité du mélange air/gaz combustible n'est pas suffisante ;
- Un trop fort excès d'air ($E_a > 3$) refroidit la chambre et dégrade la qualité de la combustion. C'est ce dernier cas, illustré sur la Figure 14 que l'on rencontre plus particulièrement sur les poêles à granulés, notamment à allure réduite.

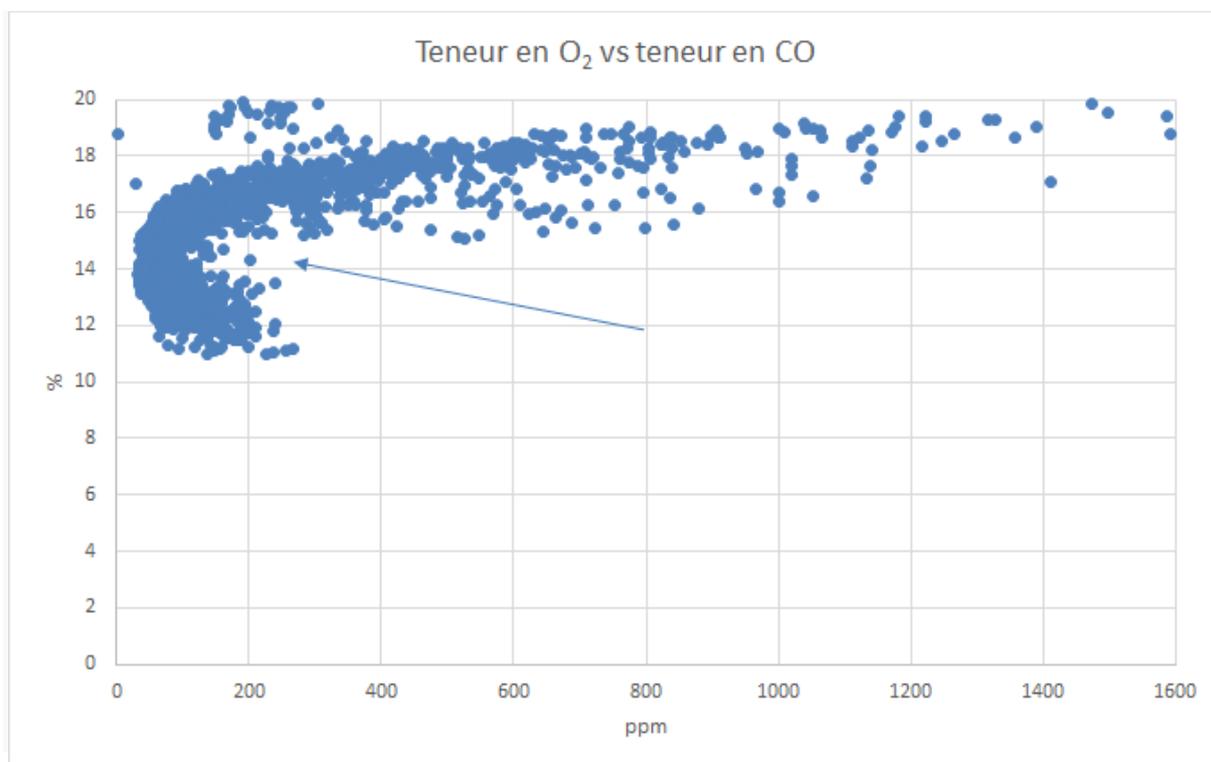


Figure 14 : évolution des teneurs en CO (valeurs brutes en ppm) en fonction des teneurs en O₂ (%). L'optimum d'excès d'air est signalé par la flèche, pour cet appareil (C2, protocole BeReal, résineux) en deçà et au-delà d'une teneur en O₂ de l'ordre de 14%, la teneur en CO augmente

Les appareils modulants testés dans le cadre de la présente étude permettent d'atteindre d'une façon générale des teneurs en CO relativement basses quelle que soit l'allure de fonctionnement utilisée. Toutefois, pour certains d'entre eux, les émissions augmentent fortement à allure réduite (qui correspond généralement à 30 % de la puissance nominale) soulignant une moins bonne gestion de l'apport en air à cette allure.

Rappelons que, sur les poêles à granulés, l'allure des appareils est pilotée par la quantité de granulés introduits dans le creuset et le débit d'air extrait. Afin d'optimiser la qualité de combustion à faible allure, le débit d'air extrait nécessite d'être adapté.

Lors de nos essais, seule une corrélation des émissions de CO avec l'excès d'air est observée ($R^2 = 0,62$). Au-delà d'un excès d'air de 3, les émissions de CO augmentent significativement ainsi que le débit d'air extrait engendrant une augmentation des pertes chimiques et thermiques et donc une baisse du rendement énergétique. Aucune autre corrélation n'est observée.

Les émissions de CO semblent cependant augmenter avec :

- L'augmentation du tirage : un tirage trop fort réduit le temps de séjour des gaz combustibles dans la chambre de combustion et apporte une trop forte quantité d'air par rapport à la quantité de granulés introduits ;
- La diminution des températures des fumées : celles-ci sont étroitement liées aux températures dans la chambre de combustion, plus ces dernières sont élevées, meilleure est la qualité de combustion. Les plus faibles températures sont obtenues à allure réduite.

5.7.5.2. Emissions de NO_x

A l'émission d'un appareil de combustion, les NO_x sont constitués essentiellement de NO (généralement à plus de 95 %). Le NO₂ se forme ultérieurement dans l'atmosphère par oxydation du NO. Plusieurs mécanismes régissent la formation des oxydes d'azote lors d'un phénomène de combustion : oxydation de l'azote de l'air, oxydation de l'azote contenu dans le combustible, formation de prompt NO_x (réactions de N₂ avec des espèces radicalaires formées dans le front de flamme, ce dernier mécanisme est généralement minoritaire). Dans le cas de la combustion de granulés, les températures dans la chambre de combustion sont trop faibles pour favoriser l'oxydation de l'azote de l'air, les émissions de NO_x sont donc étroitement liées à la teneur en azote du combustible.

5.7.5.3. Emissions de PM

Comme le CO, les PM proviennent en grande partie d'une combustion incomplète. Les PM sont constituées d'une fraction solide, constituée de suie (carbone), de matières organiques et inorganiques, et d'une fraction condensable, constituée d'espèces organiques de poids moléculaires élevés. Rappelons que, contrairement aux appareils à bûches, la fraction condensable ne représenterait pas une part significative des émissions de particules totales des poêles à granulés lorsque ces derniers fonctionnent à une allure supérieure à 40 % de la puissance nominale (mesures effectuées en laboratoire par l'Ineris sur deux poêles à granulés). A une allure plus réduite, la part de la fraction condensable devient bien plus importante (environ 41 % pour une allure réduite de l'ordre de 30 % de la puissance nominale : valeur moyenne obtenue lors de trois essais menés en laboratoire par l'Ineris sur un poêle à granulés). Rappelons également que, au cours de cette étude, les teneurs en particules ont été déterminées au moyen d'un analyseur en continu à partir d'une corrélation avec la méthode filtre chauffée, qui ne prend en compte que la fraction solide des particules et que, par conséquent, les teneurs en particules déterminées à allure réduite sont sous-estimées par rapport aux teneurs qui pourraient être attendues à l'atmosphère pour un même effluent. Il est aussi probable qu'en allure réduite la teneur en composés organiques volatils augmente, et que des aérosols organiques secondaires se forment en bien plus grande quantité. Ces espèces n'ont pas été recherchées dans le cadre de la présente étude.

5.7.6. Résultats globaux

Les résultats de mesures à l'émission de CO, NO_x et PM (particules solides) selon le protocole BeReal sont présentés dans la *Figure 15*.

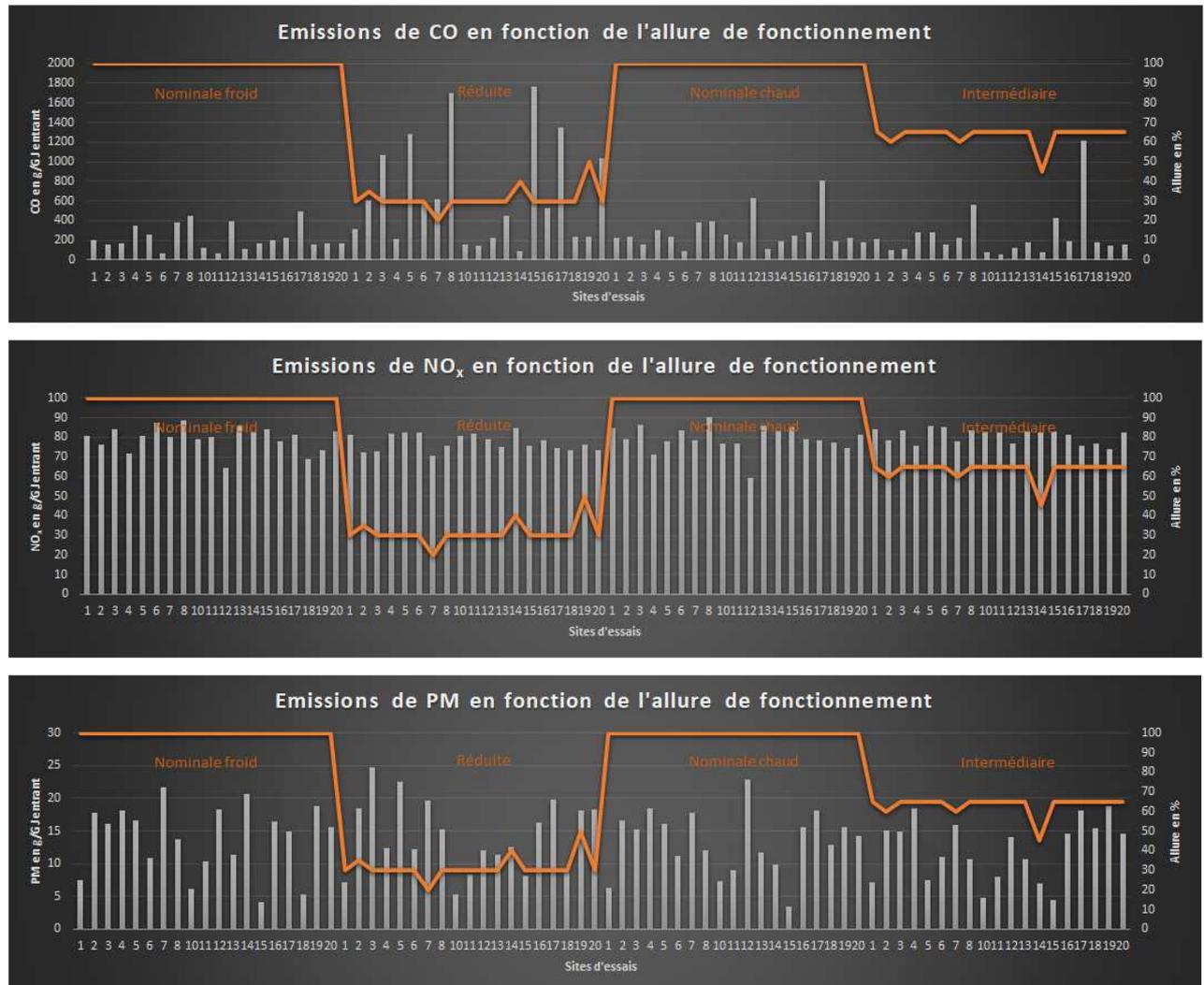


Figure 15 : facteurs d'émission, en g/GJ d'énergie entrante, de CO, NO_x et PM (particules solides) en fonction de l'allure de fonctionnement (essais menés selon le protocole BeReal).

Quelques appareils (sites n° 3, 5, 8, 15, 17 et 20) présentent des facteurs d'émission en CO élevés à allure réduite (plus de 1000 g/GJ d'énergie entrante). Rappelons que les mesures sur le site n° 17 ont été perturbées par des vents violents qui ont contribué à une forte augmentation du tirage. De plus, cet appareil n'avait pas fait l'objet d'un ramonage depuis plus de 18 mois lors de la réalisation des essais. L'impact de ces deux phénomènes sur les émissions de CO est important quelle que soit l'allure. Pour les autres appareils, les résultats obtenus (< 630 g/GJ d'énergie entrante) sont liés à leurs performances intrinsèques et aux caractéristiques de l'installation.

Pour deux appareils (sites n° 5 et 15), de très forts excès d'air, de l'ordre de 9, ont été enregistrés à allure réduite bien que les réglages aient été effectués de la même manière que sur les autres appareils en retenant une puissance P1 selon le protocole BeReal. Ces conditions de fonctionnement incorrect conduisent à de faibles rendements (44 et 59 %) ainsi qu'à de plus fortes émissions de polluants (CO notamment, 1300 et 1780 g/GJ d'énergie entrante respectivement pour les sites n° 5 et 15) que dans les autres conditions testées. Pour le site n° 5, ce fort excès d'air peut s'expliquer par le fort tirage mesuré au cours des essais en continu sur une saison de chauffe (22 Pa, valeur la plus élevée pour l'ensemble des sites instrumentés) qui conduit à un apport excessif en air comburant. Pour le site n° 15, en revanche, le tirage mesuré présente une valeur classique de 10 Pa, qui ne permet pas d'expliquer cette tendance.

Les émissions de NO_x sont similaires pour l'ensemble des appareils testés, de l'ordre de 78 g équivalent NO₂/GJ d'énergie entrante, le combustible utilisé étant identique sur tous les sites.

Les émissions de particules solides (PM) sont bien plus fluctuantes d'un appareil à l'autre. Elles sont comprises entre 4 et 25 g/GJ d'énergie entrante avec des valeurs plutôt élevées à allure réduite sur les appareils qui présentent également des facteurs d'émission en CO élevés à cette allure (sites n° 3, 5, 17 et 20 notamment). Rappelons qu'à cette allure, les émissions de particules peuvent comprendre une fraction condensable, non mesurée dans le cadre de la présente étude.

5.7.7. Comparaison essais normatifs versus essais in situ

Afin de comparer les résultats obtenus dans cette étude aux données d'émission des différents poêles communiquées par chaque constructeur, tous les résultats ont été exprimés à une teneur en oxygène de 13 %. Rappelons que les valeurs indiquées par les fabricants sont issues d'essais menés selon la norme NF EN 14785 de 2006 (pour la puissance, le rendement, la teneur en CO) et la norme NF EN 16510-1 de 2018 (pour les PM (particules solides uniquement), COV totaux et NO_x) par des laboratoires accrédités et notifiés. Ces essais sont réalisés *a minima* à allure nominale (et éventuellement à allure réduite si celle-ci est déclarée par le fabricant), ce qui correspond généralement à la puissance de chauffe P5. Les mesures sont effectuées en régime établi, dans des conditions optimales, en dehors des périodes d'allumage, de mise en régime ou d'arrêt de l'appareil.

Notons que chez les dix-neuf particuliers sélectionnés, la plupart des poêles sont réglés à une puissance P3 (intermédiaire), réglage usine généralement conservé par l'installateur.

Les données d'émission communiquées par les constructeurs ont été comparées aux résultats obtenus dans la présente étude, selon le protocole BeReal, à allure nominale lors d'un allumage à chaud avec les deux types de granulés. Ces essais comprennent un allumage de l'appareil (après un arrêt de l'appareil durant 40 mn), une phase transitoire d'augmentation de la température dans le foyer, un régime établi de 45 mn environ et une extinction du poêle (cf. Figure 16 et Tableau 14). Ils diffèrent donc de ceux menés par les constructeurs selon les normes actuelles (allure nominale en régime établi).

Les émissions de CO observées sont globalement significativement plus fortes que les résultats communiqués par les constructeurs (+ 450 % environ, granulés résineux). La prise en compte d'un allumage lors de nos essais n'explique que très modérément cet écart qui provient probablement plus des conditions opératoires (maîtrisées en laboratoire vs réelles chez les particuliers) liées aux installations.

En ce qui concerne les particules solides, les résultats obtenus dans cette étude sont globalement un peu plus élevés (de l'ordre de 30 %) que les données d'émission des constructeurs. Ce faible écart pourrait s'expliquer en partie dans ce cas par la prise en compte d'un allumage lors de nos essais.

Les rendements énergétiques annoncés par les constructeurs sont un peu plus forts que ceux obtenus au cours de cette étude (+ 5 points dans l'ensemble pour les granulés résineux).

Il est à noter que les appareils des sites n° 5, et dans une moindre mesure le site n° 15, ont des rendements médiocres. La présente étude n'a pas permis d'en déterminer la raison.

Les fortes teneurs et le faible rendement de l'appareil du site n° 17 sont à relier aux perturbations rencontrées lors des mesures (vents violents).

En faisant abstraction des résultats obtenus avec ces derniers appareils (sites n° 5, 15 et 17), l'écart de rendement entre valeurs mesurées et annoncées n'est plus que de 3 points.

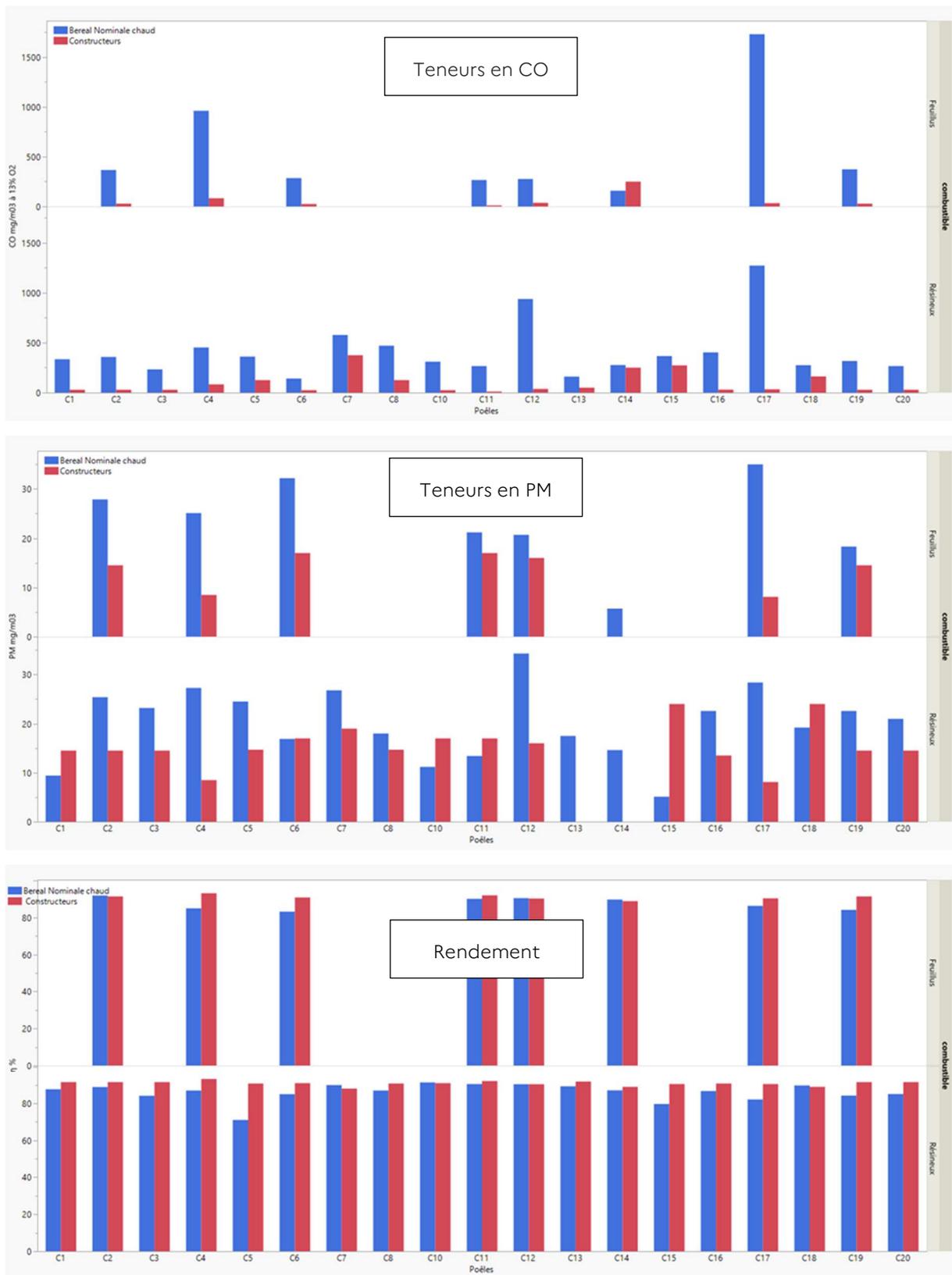


Figure 16 : comparaison des données constructeurs et des résultats obtenus (teneurs et valeurs constructeurs en CO et PM exprimées en mg/m³ à 13% d'O₂, rendement énergétique exprimé en %, protocole BeReal, granulés résineux et feuillus, allure nominale, démarrage appareil chaud).

| Valeurs moyennes | Mesurées | Valeurs constructeurs |
|---|---------------------------------------|--|
| Marche | BeReal - nominale chaud - résineux | Nominale en régime établi (conditions optimales normalisées) |
| Teneurs en CO (mg/m ³ à 13% d'O ₂) | 420 | 92,5 |
| Teneurs en PM (mg/m ³ à 13% d'O ₂) | 20,1 | 15,6 |
| Rendement (%) | 86,1 | 90,9 |

Tableau 14 : comparaison des données constructeurs et des résultats obtenus (teneurs et valeurs constructeurs exprimées en mg/m³ à 13% d'O₂, protocole BeReal, granulés résineux allure nominale, démarrage appareil chaud).

5.7.8. Ecarts de performances au sein d'un même modèle de poêle

Lors de notre campagne d'essais, deux modèles d'appareils ont été testés à plusieurs reprises (même marque, même modèle) : cinq fois pour le modèle x, deux fois pour le modèle y. Les résultats obtenus mettent en évidence des écarts de performances relativement importants, qui soulignent l'importance des réglages de l'appareil et du dimensionnement des conduits sur les performances des appareils installés. Il est à noter que la totalité de ces écarts ne peut être attribuée uniquement à ces deux paramètres, les conditions aérauliques du logement jouent aussi un rôle.

| Appareil | x | y |
|--|-----------|-----------|
| Nbre d'essais | 5 | 2 |
| Ecart maximum observé sur les émissions de CO | | |
| A allure nominale | faible | faible |
| A allure réduite | 400 % | 300 % |
| Ecart maximum observé sur le rendement | | |
| A allure nominale | 5 points | 6 points |
| A allure réduite | 11 points | 10 points |

Tableau 15 : écarts de performances pour un même modèle de poêle.

5.7.9. Impact des différentes allures ou de la puissance installée sur les émissions

Les essais menés au cours de la présente étude selon le protocole BeReal, sont effectués à différentes allures (réduite ou P1, intermédiaire ou P3, nominale ou P5) en maintenant constante chaque allure durant la période définie dans le protocole. Contrairement aux essais normatifs, ces essais ne se déroulent pas en régime établi (puisque les mesures sont démarrées sans attendre la stabilisation des paramètres de combustion, et en particulier, de la température des fumées).

Tous les appareils fonctionnent avec des excès d'air relativement forts à l'exception d'un appareil (site n° 12) qui fonctionne avec un excès d'air insuffisant (points entourés d'un cercle sur la Figure 17), ce qui occasionne probablement de plus fortes émissions de CO, de PM et une moindre formation de NO_x.

Pour un tiers des appareils environ, l'excès d'air augmente fortement avec la réduction de l'allure, notamment lorsque cette dernière tombe en deçà des 40 % de la puissance nominale, ce qui conduit aussi à une augmentation des émissions de CO et PM.

En effet, afin de maintenir la vitre propre à allure réduite, le choix est parfois fait d'augmenter la quantité d'air introduite, ce qui conduit à une moindre qualité de combustion. En outre, les conduits étant dimensionnés pour un fonctionnement optimum à puissance nominale, il en découle généralement un apport en air comburant excessif à puissance réduite. Dans ces conditions, les pertes de charges sont réduites du fait du débit massique des fumées plus faible et le besoin en air comburant est moindre

compte tenu de la réduction de l'alimentation en combustible, et ce malgré la modification de régime de fonctionnement du ventilateur d'extraction. Cet apport en air excessif est d'autant plus remarquable que :

- La plupart des appareils (du moins parmi ceux testés dans le cadre de cette étude) sont réglés pour un fonctionnement « de base » en allure intermédiaire, et non en allure nominale ;
- Aucun des particuliers ayant participé à cette étude n'a été en mesure de nous fournir la note de calcul de dimensionnement des conduits de l'installateur (de sorte que nous n'avons pas de certitude que ce dimensionnement, prévu dans la norme NF DTU 24.1 concernant les travaux de fumisterie, ait été effectué).

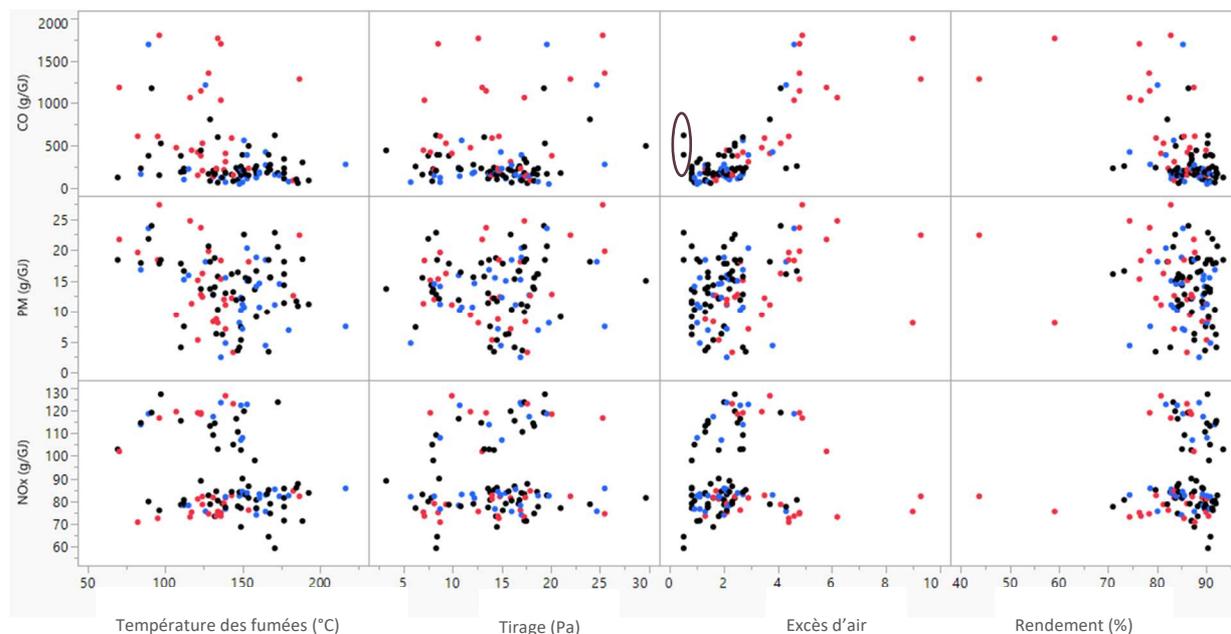


Figure 17 : évolution des émissions en fonction de divers paramètres (facteurs d'émission en polluants exprimées en énergie entrante, allure réduite en rouge, intermédiaire en bleu, nominale en noir, résineux et feuillus, protocole BeReal)

En ne prenant en compte que la combustion de granulés résineux (cf. Tableau 16), les émissions de CO suivent l'évolution de l'excès d'air avec des émissions bien plus élevées à allure réduite.

Les émissions de particules solides sont relativement stables en fonction de l'allure (valeurs comprises entre 12 et 14 g/GJ d'énergie entrante pour les granulés résineux). Rappelons toutefois qu'à allure réduite, les émissions de particules sont susceptibles de comprendre une fraction condensable, non mesurée dans le cadre de la présente étude.

Les émissions de NO_x sont particulièrement stables quelle que soit l'allure de fonctionnement des appareils, ce qui est cohérent avec le fait que ces émissions proviennent essentiellement de la quantité d'azote dans le combustible (qui ne varie pas au cours de cette étude).

Quant au rendement énergétique, il diminue fortement, d'environ 5 à 7 points, à allure réduite.

| Protocole | BeReal | | | |
|--|---|--------------|----------------|---------------|
| | Nominale froid | Réduite | Nominale chaud | Intermédiaire |
| Marche | | | | |
| Nbre d'essais | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Essence | Résineux | | | |
| Polluants à l'émission | Mesures environnementales (facteur d'émission en énergie entrante) | | | |
| CO (g/GJ) | 227 ± 61 | 664 ± 260 | 279 ± 84 | 251 ± 127 |
| PM (g/GJ) | 13,9 ± 2,5 | 14,3 ± 2,7 | 13,4 ± 2,3 | 12,2 ± 2,3 |
| NO _x (g/GJ) | 79,4 ± 3,0 | 77,5 ± 2,0 | 79,4 ± 3,2 | 80,7 ± 1,7 |
| CO ₂ (kg/GJ) | 101,2 ± 0,6 | 100,7 ± 0,8 | 101,1 ± 0,6 | 101,2 ± 0,8 |
| Polluants à l'émission | Mesures environnementales (teneurs à 13% d'O₂) | | | |
| CO (mg/m ³) | 343 ± 94 | 1013 ± 403 | 420 ± 131 | 376 ± 197 |
| PM (mg /m ³) | 20,9 ± 3,8 | 21,6 ± 4,2 | 20,1 ± 3,6 | 18,1 ± 3,5 |
| NO _x (mg eq NO ₂ /m ³) | 119,8 ± 4,8 | 117,1 ± 3,2 | 118,8 ± 5,0 | 119,9 ± 2,8 |
| CO ₂ (% volume) | 7,8 ± 0,08 | 7,8 ± 0,08 | 7,7 ± 0,05 | 7,7 ± 0,08 |
| Paramètres | Paramètres et mesures énergétiques | | | |
| Tf (°C) | 142,6 ± 12,5 | 132,7 ± 11,8 | 157,7 ± 11,6 | 155 ± 11,5 |
| Tirage (Pa) | 14,4 ± 2,7 | 14 ± 2,4 | 14,6 ± 2,3 | 14,9 ± 2,5 |
| Ea | 1,8 ± 0,5 | 3,9 ± 1,1 | 1,8 ± 0,5 | 2 ± 0,4 |
| Ps/Pn (%) | 98,5 ± 8 | 28,4 ± 4,3 | 96,9 ± 7,9 | 60,8 ± 4,9 |
| η (%) | 87,5 ± 2,2 | 80,3 ± 5,6 | 86,1 ± 2,3 | 85,5 ± 2,2 |

Tf : température des fumées, Ea : excès d'air, Ps : puissance sortante, Pn : puissance nominale, η : rendement

Tableau 16 : évolution des émissions et autres paramètres en fonction de l'allure de fonctionnement des appareils (granulés résineux, protocole BeReal).

5.7.10. Comparaison des protocoles BeReal - conditions réelles simulées

Les résultats des essais effectués selon des modes opératoires différents sont présentés dans les Tf : température des fumées, Ea : excès d'air, Ps : puissance sortante, Pn : puissance nominale, η : rendement

Tableau 17 et Tf : température des fumées, Ea : excès d'air, Ps : puissance sortante, Pn : puissance nominale, η : rendement

Tableau 18. Le nombre et la durée des essais sont différents car il n'a pas été possible de réaliser les mêmes essais en conditions réelles simulées sur tous les sites, du fait des températures extérieures trop élevées lors de certaines périodes et du manque de manœuvrabilité de certains thermostats d'ambiance.

Rappelons que les essais en conditions réelles simulées ont été réalisés selon trois modes opératoires :

- Automatique ;
- Modulation à différents niveaux de puissance ;
- Et marche/arrêt (manuel) à différents niveaux de puissance.

Lorsque la puissance de l'appareil n'est pas indiquée (automatique), les essais ont été effectués selon les conditions de marches habituelles des poêles chez les particuliers en intervenant uniquement sur la température de consigne mais pas sur le réglage de puissance de chauffe de l'appareil. Lors de ces essais deux appareils fonctionnaient en mode modulation et cinq en mode marche/arrêt.

Les essais menés en mode marche/arrêt et modulation ont été effectués sur des appareils différents, il est donc difficile de comparer ces deux marches : l'impact des performances intrinsèques d'un appareil pouvant être relativement fort, notamment à allure réduite. Néanmoins, il ressort de ces essais les informations suivantes :

- En mode modulation à différentes puissances : les appareils fonctionnent à la puissance sélectionnée (généralement P3) puis basculent à une puissance plus faible (généralement P1) lorsque la température de consigne est atteinte. Deux niveaux d'émission de polluants

correspondant aux deux niveaux de puissance utilisés sont observés lors des essais. Lorsque la combustion à allure réduite n'est pas suffisamment bien maîtrisée par l'appareil, les résultats sont particulièrement impactés par la durée de fonctionnement à cette allure qu'il conviendrait donc de minimiser. Pour cette raison, nous ne recommandons pas l'utilisation de ce mode modulation lorsque le besoin en chauffage est limité (périodes avec une météo clémente, inter-saisons), même si pour deux tiers des appareils la combustion à allure réduite est relativement bien optimisée ;

- En mode marche/arrêt, l'appareil est arrêté et redémarré manuellement par l'opérateur toutes les 30 minutes environ. Le tirage est plus faible que pour le mode modulation (de l'ordre de 5 Pa) du fait des fréquents rallumages (conduit plus froid). Quelle que soit la puissance de chauffe sélectionnée, les émissions de polluants sont fortement impactées par l'allumage (émetteur de CO et de PM) et l'arrêt (qui génère également un important pic de CO du fait du lancement d'un cycle de nettoyage du creuset en fin de combustion) du poêle. De ce fait, plus la durée de chauffage est courte, plus les émissions sont fortes. Il convient donc d'utiliser ce mode lorsque la durée de chauffage prévue est suffisamment longue.

Quel que soit le mode opératoire retenu, le fonctionnement du poêle à un niveau de puissance P1 est à l'origine des plus fortes émissions de polluants. Rappelons qu'à cette allure, une fraction condensable des particules est généralement générée. Cette dernière n'est pas prise en compte par la méthode de mesure retenue dans la présente étude. L'utilisation du poêle à un niveau de puissance P1 est donc à éviter.

Lors de l'emploi de ces deux modes opératoires (BeReal / conditions réelles simulées), peu de différences sont observées sur les émissions de NO_x, ce qui est cohérent avec le fait que tous les essais sont effectués avec un même combustible. De même, peu de différences sont observées sur les émissions de PM et CO₂ ainsi que sur le rendement énergétique. Seule la teneur en CO est plus élevée selon le protocole en conditions réelles simulées comparé au protocole BeReal.

| <i>Protocole</i> | BeReal | | Conditions réelles simulées | |
|-------------------------------|---|----------------|------------------------------------|----------------|
| <i>Essence</i> | Résineux | | Résineux | |
| <i>Nbre d'essais</i> | 44 | | 38 | |
| <i>Polluants à l'émission</i> | Mesures environnementales (valeur en énergie entrante) | | | |
| | Moyenne | Médiane | Moyenne | Médiane |
| <i>CO (g/GJ)</i> | 383 ± 119 | 231 | 560 ± 128 | 449 |
| <i>PM (g/GJ)</i> | 12,4 ± 1,6 | 13,3 | 13,0 ± 2,4 | 10,6 |
| <i>NO_x (g/GJ)</i> | 80,3 ± 1,4 | 81,2 | 78,3 ± 2,6 | 78,5 |
| <i>CO₂ (kg/GJ)</i> | 101,2 ± 0,5 | 101,1 | 100,6 ± 0,2 | 101,0 |
| <i>Paramètres</i> | Paramètres physiques et mesures énergétiques | | | |
| | Moyenne | Médiane | Moyenne | Médiane |
| <i>Tf (°C)</i> | 145,3 ± 7,8 | 147,4 | 133,8 ± 8,8 | 135,4 |
| <i>Tirage (Pa)</i> | 12,6 ± 1,4 | 13,6 | 14,1 ± 1,8 | 13,2 |
| <i>Ea</i> | 2,6 ± 0,58 | 2,1 | 3,1 ± 0,5 | 3,1 |
| <i>Ps/Pn (%)</i> | 70 ± 9,6 | 81,1 | 58,9 ± 7,7 | 59,0 |
| <i>η (%)</i> | 83,6 ± 2,7 | 85,9 | 83,5 ± 2 | 84,1 |

Tf : température des fumées, *Ea* : excès d'air, *Ps* : puissance sortante, *Pn* : puissance nominale, *η* : rendement

Tableau 17: résultats obtenus selon des protocoles opératoires différents.

Des résultats plus détaillés sont présentés dans le *Tf* : température des fumées, *Ea* : excès d'air, *Ps* : puissance sortante, *Pn* : puissance nominale, *η* : rendement

Tableau 18. En conditions réelles simulées, du fait d'un nombre plus élevé d'allumages et de nettoyages du creuset en fin de combustion, les émissions de PM sont sensiblement supérieures lors des essais menés en mode marche/arrêt que lors des essais menés en mode modulation.

| <i>Marche</i> | Automatique | Modulation P1 | Modulation P3 | Modulation P5 | Marche/arrêt P1 | Marche/arrêt P3 | Marche/arrêt P4 | Marche/arrêt P5 |
|-------------------------------|---|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <i>Allure (%)</i> | 61 | 30 | 61 | 85 | 30 | 59 | 71 | 100 |
| <i>Essence</i> | Résineux | Résineux | Résineux | Résineux | Résineux | Résineux | Résineux | Résineux |
| <i>Nbre d'essais</i> | 7 | 4 | 4 | 4 | 3 | 5 | 5 | 6 |
| <i>Polluants à l'émission</i> | Mesures environnementales (valeurs en énergie entrante) | | | | | | | |
| <i>CO (g/G)</i> | 275 ± 157 | 742 ± 753 | 679 ± 765 | 555 ± 435 | 904 ± 764 | 572 ± 404 | 427 ± 302 | 624 ± 446 |
| <i>PM (g/G)</i> | 12,6 ± 6,1 | 9,7 ± 2,1 | 11,5 ± 6,1 | 8,2 ± 2,5 | 13,7 ± 14 | 15,2 ± 12,3 | 16,9 ± 10,7 | 15,1 ± 9,3 |
| <i>NO_x (g/G)</i> | 73,2 ± 14 | 79,5 ± 5,5 | 83,1 ± 2,9 | 81,6 ± 6 | 73,9 ± 4 | 77,9 ± 5,01 | 79,8 ± 4,7 | 79,5 ± 4,9 |
| <i>CO₂ (kg/G)</i> | 100,9 ± 0,6 | 100,6 ± 1,1 | 100,7 ± 1,1 | 100,9 ± 0,7 | 99,6 ± 2,2 | 100,3 ± 1 | 100,8 ± 0,4 | 100,3 ± 0,7 |
| <i>Paramètres</i> | Paramètres physiques et mesures énergétiques | | | | | | | |
| <i>Tf (°C)</i> | 136,5 ± 14,2 | 146,3 ± 40,5 | 143,4 ± 7 | 151,1 ± 47,2 | 110,2 ± 40,4 | 120,7 ± 34,4 | 120,3 ± 36,8 | 138,2 ± 29,3 |
| <i>Tirage (Pa)</i> | 16,4 ± 5,3 | 16,6 ± 7,6 | 17,2 ± 8,5 | 16,4 ± 9,6 | 11,5 ± 2,5 | 11,5 ± 5,2 | 10,4 ± 6,9 | 11,5 ± 4,4 |
| <i>Ea</i> | 2,2 ± 0,9 | 2,8 ± 1,9 | 3,3 ± 0,9 | 2,4 ± 1,2 | 5,0 ± 4,6 | 3,6 ± 2,3 | 3 ± 1,6 | 3,4 ± 1,9 |
| <i>Ps/Pn (%)</i> | - | - | - | - | 23,0 ± 3,0 | 48,8 ± 16,7 | 58,1 ± 21,6 | 83,3 ± 16,9 |
| <i>η (%)</i> | 86,4 ± 3 | 82,8 ± 9,4 | 79 ± 7,2 | 83,8 ± 7,2 | 79,3 ± 23,9 | 83,8 ± 9 | 87 ± 2,5 | 82,3 ± 5,6 |

Tf: température des fumées, *Ea*: excès d'air, *Ps*: puissance sortante, *Pn*: puissance nominale, *η*: rendement

Tableau 18 : résultats détaillés obtenus selon des protocoles opératoires différents.

5.7.11. Impact du refroidissement du poêle sur les émissions de polluants lors de l'allumage

L'influence du refroidissement du poêle sur les émissions de polluants peut être approchée via la comparaison des essais menés à allure nominale selon le protocole BeReal (1) après arrêt du poêle durant 40 mn, considéré comme un allumage à chaud, et (2) après extinction du poêle durant au moins trois heures, considéré comme un allumage à froid. Les résultats sont présentés pour chaque type de granulés testés, feuillus et résineux, dans le T_f : température des fumées, E_a : excès d'air, P_s : puissance sortante, P_n : puissance nominale, η : rendement
Tableau 20.

A puissance nominale, un allumage à froid de l'appareil (après arrêt d'au moins 3 heures de l'appareil) n'est pas particulièrement plus émissif qu'un démarrage à chaud (après arrêt de 40 minutes). Au contraire, les émissions de CO sont même sensiblement plus faibles pour les deux combustibles utilisés. Cela s'explique par la prise en compte, lors des essais « démarrage à chaud », du pic de CO en fin de combustion (correspondant au nettoyage du creuset), ces essais étant arrêtés au bout de 50 mn alors que les essais « démarrage à froid » ne le sont pas (cf. protocole BeReal Tableau 12). Les émissions de particules solides et de NO_x, ainsi que le rendement énergétique, ne sont pas particulièrement affectées par ce type de démarrage à froid (rappelons que la fraction condensable des particules n'a pas été prise en compte lors de nos essais). Le tirage et l'excès d'air sont très légèrement inférieurs, tandis que les températures des fumées sont nettement plus faibles (plus de 10°C) lors d'un allumage à froid par comparaison avec un allumage à chaud.

5.7.12. Comparaison des deux combustibles

Les résultats des essais effectués avec les mêmes appareils sur les granulés résineux et feuillus sont présentés dans les Tableau 19 et Tableau 20 ainsi que sur la Figure 18.

Ces essais ont été menés avec des tirages relativement comparables. L'écart moyen de tirage entre ces deux combustibles est de 2,5 Pa. Cet écart est relativement faible mais néanmoins constant quelle que soit l'allure de fonctionnement de l'appareil. La combustion de granulés résineux est un peu plus chaude que celles des feuillus : températures des fumées plus hautes (24°C en moyenne), puissances entrantes et sortantes plus élevées.

Rappelons que les appareils sont pré-réglés par les constructeurs avec des granulés résineux, principales essences actuellement utilisées en France, et qu'un réglage sur des granulés feuillus serait nécessaire afin d'optimiser leur combustion avec ce type de combustible. Il n'est donc pas étonnant d'obtenir des excès d'air (E_a) plus faibles lors de la combustion de granulés résineux, la combustion étant optimisée. Les résultats obtenus doivent donc être imputés à la qualité des granulés mais aussi dans une certaine mesure aux réglages initiaux des appareils. Dans une certaine mesure seulement car les conditions de fonctionnement des appareils lors de la combustion de granulés feuillus sont restées convenables et relativement similaires à celles des granulés résineux notamment à allure nominale et intermédiaire (0,5 point d'écart d'excès d'air). Cependant, une plus forte dégradation de la qualité de combustion a lieu à allure réduite (1,3 point d'écart d'excès d'air).

| Protocole | BeReal | | | |
|-------------------------|---|---------|-------------|---------|
| | Feuillus | | Résineux | |
| Essence | Feuillus | | Résineux | |
| Nbre d'essais | 32 | | 32 | |
| Polluants à l'émission | Mesures environnementales (valeurs en énergie entrante) | | | |
| | Moyenne | Médiane | Moyenne | Médiane |
| CO (g/GJ) | 423 ± 167 | 212 | 317 ± 114 | 198 |
| PM (g/GJ) | 14,6 ± 2,2 | 13,65 | 14,9 ± 1,5 | 15,3 |
| NO _x (g/GJ) | 114,8 ± 8 | 116,0 | 77,7 ± 2,2 | 78,4 |
| CO ₂ (kg/GJ) | 99,1 ± 0,5 | 99,65 | 100,8 ± 0,4 | 101 |
| Paramètres | Paramètres physiques et mesures énergétiques | | | |
| | Moyenne | Médiane | Moyenne | Médiane |
| Tf (°C) | 125,3 ± 10 | 131,6 | 149,3 ± 9,6 | 154,0 |
| Tirage (Pa) | 14,6 ± 1,5 | 14,6 | 17,1 ± 1,7 | 17,0 |
| Ea | 2,5 ± 0,4 | 2,5 | 1,9 ± 0,4 | 1,8 |
| Ps/Pn (%) | 61,4 ± 9,5 | 60,2 | 72,8 ± 11,7 | 63,9 |
| η (%) | 87,1 ± 1,3 | 87,0 | 86,5 ± 1,3 | 87,0 |

Tf : température des fumées, Ea : excès d'air, Ps : puissance sortante, Pn : puissance nominale, η : rendement

Tableau 19 : comparaison des résultats obtenus avec des granulés feuillus et résineux selon le protocole BeReal.

| Protocole | BeReal | | | | | | | |
|-------------------------|---|----------------|--------------|--------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| | Nominale chaud | Nominale chaud | Réduite | Réduite | Nominale froid | Nominale froid | Intermédiaire | Intermédiaire |
| Allure | Feuillus | Résineux | Feuillus | Résineux | Feuillus | Résineux | Feuillus | Résineux |
| Nbre d'essais | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Polluants à l'émission | Mesures environnementales (valeurs en énergie entrante) | | | | | | | |
| | CO (g/GJ) | 368 ± 296 | 332 ± 204 | 749 ± 466 | 432 ± 344 | 204 ± 117 | 233 ± 131 | 371 ± 442 |
| PM (g/GJ) | 15,1 ± 4,9 | 14,2 ± 3,3 | 15,5 ± 6,5 | 16,5 ± 4,7 | 14,4 ± 4,4 | 15,3 ± 3,6 | 13,6 ± 5,3 | 12,6 ± 3,3 |
| NO _x (g/GJ) | 112,5 ± 6,9 | 75,8 ± 6,4 | 118,0 ± 5,8 | 79,1 ± 3,5 | 111,9 ± 7,1 | 77,2 ± 6,0 | 116,7 ± 5,3 | 78,8 ± 3,3 |
| CO ₂ (kg/GJ) | 99,1 ± 1 | 100,8 ± 0,7 | 98,8 ± 1,5 | 100,8 ± 1,3 | 99,4 ± 0,9 | 101 ± 0,7 | 99,2 ± 1,3 | 100,8 ± 0,7 |
| Paramètres | Paramètres physiques et mesures énergétiques | | | | | | | |
| | Tf (°C) | 133,0 ± 25,4 | 160,9 ± 22,6 | 115,4 ± 19,6 | 137,0 ± 20,5 | 122,6 ± 23,3 | 146,6 ± 24,2 | 130,0 ± 22,8 |
| Tirage (Pa) | 14,5 ± 3,2 | 17,5 ± 3,6 | 14,8 ± 4,7 | 16,2 ± 3,9 | 14,2 ± 3,4 | 17,3 ± 4,9 | 14,9 ± 3 | 17,3 ± 3,6 |
| Ea | 2,1 ± 0,8 | 1,6 ± 0,8 | 3,7 ± 1 | 2,3 ± 1 | 1,9 ± 0,5 | 1,4 ± 0,5 | 2,4 ± 0,8 | 1,9 ± 0,9 |
| Ps/Pn (%) | 82,6 ± 12,5 | 98,2 ± 16,2 | 27,4 ± 6,2 | 32,8 ± 8,3 | 84 ± 12,5 | 100,4 ± 17,3 | 51,5 ± 6,1 | 59,6 ± 8,4 |
| η (%) | 87,7 ± 2,7 | 86,9 ± 2,4 | 84,4 ± 2,7 | 84,0 ± 3,0 | 89,2 ± 2,7 | 88,7 ± 2,7 | 87,3 ± 2,7 | 86,3 ± 2,9 |

Tf : température des fumées, Ea : excès d'air, Ps : puissance sortante, Pn : puissance nominale, η : rendement

Tableau 20 : comparaison des résultats obtenus avec des granulés feuillus et résineux selon le protocole BeReal à différentes allures.

Concernant les émissions de CO, globalement les résultats sont un peu plus élevés lors de la combustion de granulés feuillus du fait de plus forts excès d'air : valeur moyenne plus forte pour les feuillus (423 vs 317 g/GJ d'énergie entrante) mais médiane similaire à celle des résineux (212 vs 198 g/GJ d'énergie entrante). L'écart moyenne – médiane rend compte d'une distribution inhomogène des données, la moyenne étant particulièrement impactée par des valeurs fortes (allures réduites). A allure réduite, les émissions de CO sont bien plus élevées lors de la combustion de granulés feuillus du fait des plus forts excès d'air. Les émissions de CO de ces deux types de granulés ne sont cependant pas statistiquement différentes (selon le test de Student).

Lors de la combustion de ces deux types de granulés, aucune différence n'est observée sur les émissions de particules solides (4,6 vs 4,9 g/GJ d'énergie entrante). Les rendements énergétiques obtenus sont également similaires.

Entre ces deux combustibles, seules les émissions de NO_x sont statistiquement différentes. Les résultats obtenus confirment la prédominance du mécanisme de formation des NO_x à partir de l'azote contenu dans le combustible. Ils sont stables d'un appareil à l'autre, quelles que soient leurs allures de fonctionnement mais dépendent du combustible consommé avec en moyenne des facteurs d'émission de 115 g équivalent NO₂/GJ d'énergie entrante pour les granulés feuillus et de 78 g équivalent NO₂/GJ d'énergie entrante pour les granulés résineux (pour des teneurs en azote dans le combustible respectivement de 0,10 et 0,12% sur sec).

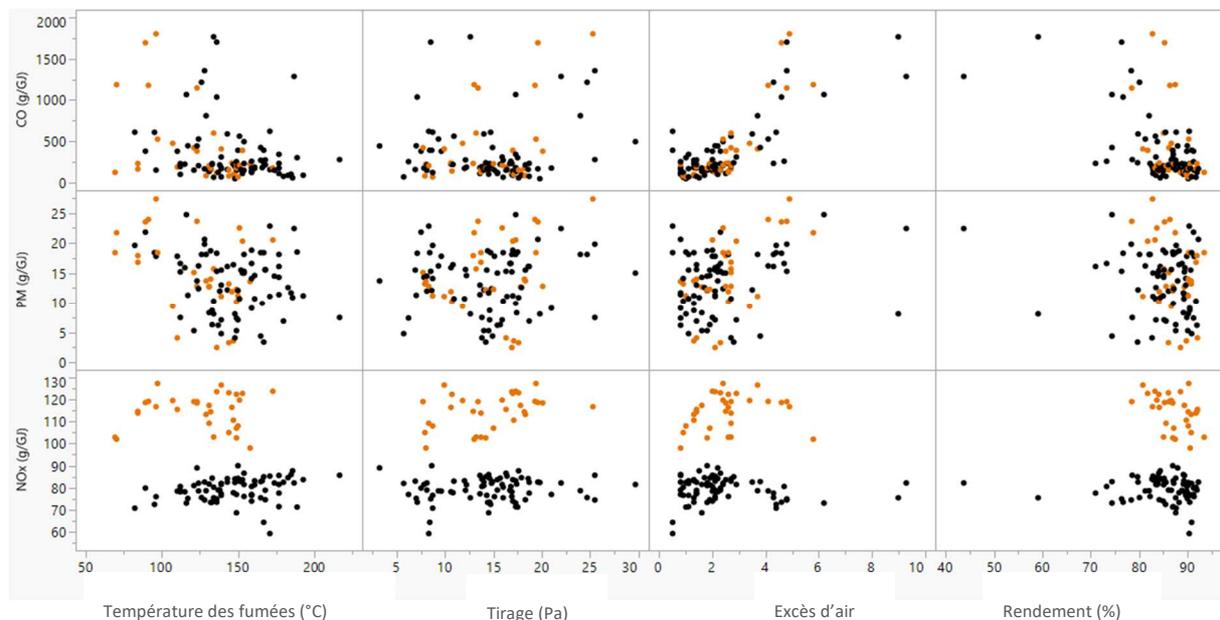


Figure 18 : évolution des facteurs d'émission en polluants en fonction de différents paramètres (facteurs d'émission exprimés en énergie entrante, feuillus en orange, résineux en noir, protocole BeReal, toutes les allures, tous les essais).

5.7.13. Comparaison des résultats à ceux de la littérature

Afin de comparer nos résultats à ceux rapportés dans la littérature de la manière la plus fiable possible, les principaux facteurs exerçant une influence sur les émissions de polluants tels que l'allure de fonctionnement, les conditions d'essais, la teneur en azote des granulés, la méthode de prélèvement des particules et la granulométrie des particules, ont été recherchés dans les publications.

Même si nous pouvons supposer que la prise en compte de la fraction condensable des particules via la méthode de prélèvement utilisée n'a qu'un impact modeste sur la teneur en PM déterminée (les émissions étant essentiellement constituées de particules solides), il nous a paru important de relever la méthode de prélèvement des particules utilisée. Rappelons que plusieurs méthodes sont utilisées pour quantifier les émissions particulaires. La méthode « filtre chauffée » ne prend en compte que la fraction solide des particules ce qui conduit à des facteurs d'émission plus faibles. Les méthodes « filtre chauffée avec barboteurs » et « tunnel à dilution » prennent en compte les fractions solides et condensables, séparément pour la première et sans distinction entre ces deux fractions pour la seconde. Plus

d'informations sur les différentes méthodes utilisées et leurs impacts sur les émissions de particules, sont disponibles dans la synthèse Ineris, 2018.

De la même façon, tous les laboratoires ne mesurent pas les mêmes tailles de PM (PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀, PM_{totale}). Là encore même si les PM sont constituées essentiellement de particules fines (PM₁), cette information reste intéressante à relever.

Les principaux résultats obtenus dans cette étude sont comparés à ceux rapportés dans la littérature dans le *Tableau 21*.

| Polluants | Facteurs d'émission (en mg/GJ entrant) | Allure, teneur en azote du combustible, PM _x et méthode de prélèvement des particules | Références |
|-----------------|--|--|-------------------------------|
| CO | 227-279 | BeReal AI et AN | Présente étude |
| | 664 | BeReal AR | Présente étude |
| | 659 | Conditions réelles - modulation | Présente étude |
| | 632 | Conditions réelles – marche/arrêt | Présente étude |
| | 36-120 | AN | Johansson et al., 2004 |
| | 92-200 | AN | Bäfver et al, 2011 |
| | 100-130 | AN | Boman et al., 2011 |
| | 300 | AN – conditions réelles simulées | Peren ² bois, 2011 |
| NO _x | 400-430 | AN – conditions réelles simulées | Fachinger et al., 2017 |
| | 115 | 0,12% d'azote | Présente étude |
| | 78 | 0,10% d'azote | Présente étude |
| | 68 | 0,08% d'azote | Johansson et al., 2004 |
| | 99 | | Boman et al., 2011 |
| PM | 88 | | Peren ² bois, 2011 |
| | 12,2-14,3 | BeReal, estimation PM _t filtre chauffé | Présente étude |
| | 10,5 | Conditions réelles – automatique, estimation PM _t filtre chauffé | Présente étude |
| | 15,2 | Conditions réelles - marche/arrêt estimation PM _t filtre chauffé | Présente étude |
| | 16-22 | PM _t - filtre et barboteur | Johansson et al., 2004 |
| | 29-53 | PM _{2,5} - filtre chauffé | Bäfver et al, 2011 |
| | 16-23 | PM _t - tunnel à dilution | Boman et al., 2011 |
| | 44 (solide) + 36 (condensable) | PM _t – filtre et condensable | Peren ² bois, 2011 |
| 11-17 | PM ₁ - dilution (éjecteur) | Fachinger et al., 2017 | |

AN, AI et AR : allure nominale, intermédiaire et réduite

Tableau 21 : facteurs d'émission de polluants rapportés pour les poêles à granulés dans la littérature, Seuls les essais menés dans la présente étude ont été effectués in situ (tous les autres essais ont été effectués en laboratoire).

Les facteurs d'émission de CO obtenus dans le cadre de la présente étude sont sensiblement plus élevés par rapport à ceux rapportés dans des études réalisées en laboratoire. Les essais de Fachinger et al., 2017 ont été menés dans des conditions de fonctionnement proches des conditions réelles (réglage d'usine, allumage à froid, mesure durant trois cycles de 2h30 : 2h de marche, 30 mn d'arrêt) ce qui explique selon l'auteur des valeurs en CO bien plus élevées que celles observés lorsque l'appareil fonctionne à allure nominale, allure utilisée dans le cadre des autres études. Les niveaux de tirage élevés relevés dans cette étude (8 à 22 Pa en allure intermédiaire) sont également à l'origine d'un excédent d'apport en air comburant, conduisant à un trop fort excès d'air dans le poêle, ce qui a été décrit précédemment comme source de CO (*Figure 15*).

Lorsque les essais sont menés en conditions réelles, nos résultats sont relativement comparables à ceux de la littérature (Fachinger et al, 2017, Peren²bois, 2011). Les facteurs d'émission en CO déterminés à allure réduite ne peuvent être comparés à ceux de la littérature, faute de données disponibles.

L'ensemble de ces résultats confirme l'impact des conditions réelles de fonctionnement des appareils sur les émissions de CO.

Les facteurs d'émission de NO_x obtenus lors de nos essais sont relativement similaires à ceux rapportés dans la littérature. Malheureusement le principal facteur qui influence les émissions de ces polluants, la

teneur en azote du combustible, n'est pas toujours bien renseigné dans les publications, ce qui ne permet pas de réaliser une analyse très poussée.

En ce qui concerne les émissions de PM rapportées dans la littérature, à l'exception des essais menés dans le cadre du projet Peren²bois, la fraction condensable représente *a priori* une part relativement modeste des émissions de PM : les valeurs relevées avec ou sans prise en compte de la fraction condensable étant similaires. Les essais Peren²bois ont été menés avec un excès d'air élevé ($\lambda_a > 7$). Dans ces conditions dégradées, la fraction condensable représentait 45 % des émissions de PMt. Il est à noter que lors de nos essais menés en laboratoire (cf. rapport d'annexes ; comparaison de la méthode automatique (PPS) avec la méthode filtre et barboteur), la fraction condensable contribue à environ 41 % des PMt à allure réduite ($\lambda_a = 4$), soit une valeur relativement comparable à ceux obtenus dans le cadre de l'étude Peren²bois. Là encore, les résultats obtenus sur les dix-neuf sites sont comparables à ceux de Fachinger et al., 2017 mais aussi à ceux de Johansson et al., 2004 et de Boman et al., 2011. Il est à noter que les résultats des essais du projet Peren²bois se distinguent du fait de l'utilisation d'un appareil ancien particulièrement peu performant.

5.7.14. Estimation des flux émis durant l'ensemble d'une saison de chauffe

Les résultats obtenus lors des tests menés chez les particuliers ont été extrapolés à l'ensemble d'une saison de chauffe (début novembre à fin mars) afin d'estimer les flux de polluants émis durant cette période. Pour cela, la quantité de combustible consommée durant toute la saison de chauffe a été multipliée par le facteur d'émission déterminé au niveau de puissance correspondant au taux de charge estimé durant cette période :

- Pour un taux de charge saisonnier inférieur à 30 %, le facteur d'émission déterminé à allure réduite est retenu ;
- Pour un taux de charge compris entre 30 et 65 %, le facteur d'émission déterminé à allure intermédiaire est pris en compte ;
- Enfin pour un taux de charge supérieur à 65 %, le facteur d'émission déterminé à allure nominale avec un allumage à chaud est retenu.

On rappelle ici, que compte tenu de la pandémie, les essais ponctuels chez les particuliers n'ont pas pu être réalisés sur la même saison de chauffe que le suivi en continu décrit au chapitre 4 et dont les résultats sont utilisés pour extrapoler.

Les résultats sont présentés dans le **Tableau 22**.

| Site | Consommation granulés (en kg) | Taux de charge de l'appareil (%) | Flux en CO émis (kg) | Flux en CO ₂ émis (t) | Flux en NO _x émis (kg) | Flux en PM émis (kg) |
|------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 1 | 420 | .54 | 1,6 | 0,8 | 0,7 | 0,06 |
| 2 | 1305 | 75 | 5,7 | 2,4 | 1,9 | 0,40 |
| 3 | 1148 | 83 | 3,3 | 2,1 | 1,8 | 0,33 |
| 4 | 1305 | 82 | 7,4 | 2,5 | 1,7 | 0,45 |
| 5 | 1613 | 57 | 8,5 | 3,0 | 2,6 | 0,23 |
| 6 | 1260 | 59 | 3,8 | 2,3 | 2,0 | 0,26 |
| 7 | 1095 | 39 | 4,6 | 2,1 | 1,6 | 0,32 |
| 8 | 2370 | 49 | 24,8 | 4,4 | 3,7 | 0,47 |
| 9 | 2115 | 48 | | | | |

| | | | | | | |
|--|------|----|------|-----|-----|------|
| 10 | 810 | 44 | 1,1 | 1,5 | 1,2 | 0,07 |
| 11 | 690 | 97 | 2,3 | 1,3 | 1,0 | 0,12 |
| 12 | 1440 | 28 | 5,9 | 2,7 | 2,1 | 0,32 |
| 13 | 960 | 57 | 3,2 | 1,8 | 1,5 | 0,19 |
| 14 | 698 | 23 | 1,2 | 1,3 | 1,1 | 0,16 |
| 15 | 1260 | 55 | 10,0 | 2,3 | 1,9 | 0,10 |
| 16 | 1485 | 84 | 7,7 | 2,9 | 2,2 | 0,43 |
| 17 | 1170 | 55 | 26,5 | 2,2 | 1,6 | 0,39 |
| 18 | 1740 | 63 | 5,6 | 3,3 | 2,5 | 0,50 |
| 19 | 765 | 69 | 3,1 | 1,5 | 1,1 | 0,22 |
| 20 | 1110 | 67 | 3,7 | 2,1 | 1,7 | 0,29 |
| Valeur moyenne (hors site n° 17) | | | 5,8 | 2,2 | 1,8 | 0,27 |
| Valeur moyenne H1 | | | 7,2 | 2,5 | 2,1 | 0,29 |
| Valeur moyenne H2 | | | 4,1 | 1,9 | 1,5 | 0,25 |
| Valeur moyenne H3 (hors site n° 17) | | | 4,9 | 2,4 | 1,9 | 0,35 |
| Valeur logement RT 2012 (sites n° 1 et 11) | | | 2,0 | 1,0 | 0,8 | 0,09 |

Tableau 22 : estimation des flux en polluants émis durant l'ensemble de la saison de chauffe (zones climatiques en orange (H1), en jaune (H2) et en blanc (H3). En bleu (site n° 17) : mesures perturbées par des vents violents.

Les flux de polluants estimés émis durant une saison de chauffe sont compris entre 1,1 et 24,5 kg pour le CO, 0,7 et 3,7 kg équivalent NO₂ pour les NO_x et 0,06 à 0,50 kg pour les particules solides. Ces résultats sont étroitement liés aux quantités de combustible consommées durant la saison de chauffe qui dépendent notamment des caractéristiques des logements (isolation et volume à chauffer) et de leurs situations géographiques ainsi que du mode de vie des habitants.

A titre d'information, des valeurs moyennes (hors site n° 17) sont proposées en bas du *Tableau 22*:

- Par zones climatiques ;
- Pour les sites n° 1 et 11 qui sont des logements basses consommations (labellisés RT 2012) beaucoup moins énergivores et donc bien moins émissifs.

6. Calcul de dimensionnement des conduits

Lors de la phase de recueil des documents auprès des candidats, en début d'étude, il a été constaté qu'aucun d'entre eux ne disposait d'une note de calcul de dimensionnement des conduits fournie par l'installateur (de sorte que nous n'avons pas de certitude que ce dimensionnement ait été effectué).

Les calculs de dimensionnement des conduits réalisés dans le cadre de ce projet visent ainsi à évaluer *a posteriori* si des divergences majeures existent entre les règles de mise en œuvre et la façon dont les poêles à granulés étudiés ont été installés. Notons que les résultats obtenus restent approximatifs, c'est pourquoi seules d'éventuelles différences majeures peuvent être mises en évidence, puisque ces calculs sont effectués *a posteriori* sur la base des données disponibles (généralement incomplètes).

6.1. Présentation des calculs de dimensionnement de conduit

Comme décrit sur la *Figure 19*, le conduit d'évacuation des produits de combustion d'un appareil de chauffage au bois se compose de trois éléments principaux :

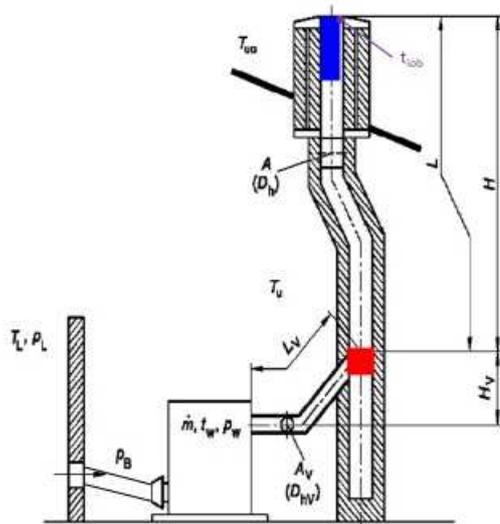
- Un conduit de raccordement, généralement non isolé et situé entre la buse d'évacuation des produits de combustion de l'appareil et le plafond de la pièce dans laquelle cet appareil est installé ;
- Un conduit de fumée situé entre le conduit de raccordement et le terminal ;
- Un terminal, situé en toiture.



Figure 19 : représentation schématique d'un conduit d'évacuation des produits de combustion et de ses différentes parties (adapté d'un schéma de la société Poujoulat).

Les appareils de chauffage raccordés en configuration étanche, comme c'est généralement le cas des poêles à granulés (et comme défini comme critère de choix des appareils sélectionnés pour cette étude), sont en outre dotés d'un conduit d'amenée d'air, situé entre la buse d'amenée d'air de l'appareil et l'extérieur. Ce conduit permet de rendre l'appareil indépendant de l'air ambiant du logement (et des éventuelles fluctuations de pression liées à l'utilisation de hottes aspirantes en cuisine, à la ventilation mécanique contrôlée, etc.).

La *Figure 20* permet de schématiser certaines grandeurs utilisées dans les calculs de dimensionnement des conduits selon la norme NF EN 13384-1 (2019).



P_Z : Dépression au niveau de l'admission des fumées dans le conduit de fumée, calculée « côté conduit de raccordement », avec $P_Z = P_H - P_R - P_L$

P_{Ze} : Dépression au niveau de l'admission des fumées dans le conduit de fumée, calculée « côté conduit de fumée », avec $P_{Ze} = P_{FV} + P_W + P_B - P_L$

P_H : Tirage naturel (dû à l'effet cheminée)

P_R : Pertes de charge dans le conduit de fumée

P_L : Pression de la vitesse du vent

P_{FV} : Pertes de charge dans le conduit de raccordement

P_B : Pertes de charge sur l'alimentation en air extérieur et le conduit d'amenée d'air

P_W : Tirage minimum à la buse (des fumées) requis par le fabricant

t_{iob} : Température de la paroi intérieure du conduit de fumée au débouché

H : Hauteur du conduit de fumée

L : Longueur développée du conduit de fumée

H_V : Hauteur du conduit de raccordement

L_V : Longueur développée du conduit de raccordement

Figure 20 : représentation schématique de certaines grandeurs utilisées dans les calculs de dimensionnement des conduits (adapté d'un schéma de la formation QualiBois).

Ces calculs de dimensionnement des conduits selon la norme NF EN 13384-1 (2019) consistent à déterminer ces différentes grandeurs et vérifier que :

- La pression au point de jonction entre le conduit de raccordement et le conduit de fumée (représenté par un carré rouge sur la Figure 20) calculée « côté conduit de fumée » (P_Z) est supérieure ou égale à cette même pression calculée « côté conduit de raccordement » (P_{Ze}) : $P_Z \geq P_{Ze}$ et donc $P_Z - P_{Ze} \geq 0$ Pa ;
- La température de la paroi intérieure du conduit de fumée au débouché (t_{iob}) est supérieure ou égale à une température notée t_g , généralement considérée égale à 0°C dans le cas des conduits résistants aux condensats (comme c'est le cas de ceux dédiés aux appareils de chauffage au bois) : $t_{iob} \geq t_g$ et donc $t_{iob} - t_g \geq 0$ °C.

6.2. Méthodologie appliquée & Hypothèses de calcul

Les calculs de dimensionnement réalisés dans le cadre de cette étude ont été effectués à l'aide du logiciel dédié Kesa-Aladin. Ce logiciel a été choisi parmi les nombreux outils disponibles (Quick Calculation, Install Bois, Conduit'Réno, Cat-Draw, Optiflam, Dinacalc, etc) du fait qu'il s'agit d'un logiciel historique de calcul des conduits, bien répandu auprès des professionnels du domaine au niveau européen. Les calculs ont été effectués *a posteriori*, sur la base de données collectées :

- Via les questionnaires remplis par les particuliers ;
- Par analyse des devis / factures des installateurs ;
- Par analyse des notices des poêles à granulés ;
- Par utilisation de la base de données du logiciel Kesa-Aladin ;

- Via des recherches sur les sites Internet des fabricants de conduits ;
- Par utilisation de données disponibles dans les Documents Techniques d'Application (DTA) des conduits ;
- Via des relevés sur site (mesures, photos) effectués lors des audits énergétiques (par Wigwan Conseil) et lors des mesures en non continu (par l'Ineris).

Parallèlement, en l'absence de données disponibles pour certains paramètres sur certains sites, plusieurs hypothèses ont dû être appliquées au cours des calculs :

- Pour les sites n° 5, 7, 8, 13, 14, 15 et 17, la teneur en CO₂ des fumées a été évaluée sur la base de la valeur moyenne des autres sites ;
- Pour le site n° 14, le débit massique des fumées a été évalué sur la base de la valeur moyenne des autres sites ;
- Pour les sites n° 5 et 14, une valeur de 0 Pa de tirage minimum requis à la buse a été utilisée ;
- Pour l'ensemble des sites, il a été supposé que le conduit d'amenée d'air était un tube flexible en polyéthylène, excepté le site n° 11 (tube lisse en polypropylène) et le site n° 16 (tube flexible en inox) en tenant compte des photos disponibles ;
- Pour les sites n° 7 et 16, le conduit d'amenée d'air est enterré, mais aucun plan n'est disponible pour déterminer précisément son cheminement, qui a donc été évalué en considérant le plus court chemin vers la grille identifiée comme étant la bouche d'entrée d'air comburant ;
- Pour l'ensemble des sites, une hypothèse a été faite sur la marque et le modèle du conduit de raccordement, à l'exception des sites n° 1, 7, 12 et 17 pour lesquels la marque du conduit (et éventuellement son modèle) était disponible ;
- Pour les sites n° 4, 6, 11 et 16, une hypothèse a été faite sur la marque et le modèle du conduit de fumée double paroi isolée ;
- Pour les sites n° 2, 3, 10, 13, 14, 15, 18, 19, une hypothèse a été faite sur la marque et le modèle du tubage en boisseau » ;
- Pour les sites n° 12 et 17, le tubage en boisseau a été considéré de même marque que le conduit de raccordement ;
- Pour les sites n° 2 et 7, le diamètre du conduit de fumée a été supposé égal à celui de la buse d'évacuation des fumées du poêle ;
- Pour le site n° 8, il a été supposé un conduit de fumée de diamètre 100 mm, compte tenu des dimensions de conduits disponibles dans la marque installée (et du diamètre de la buse d'évacuation des fumées du poêle). Il a en outre été supposé un boisseau de 200 mm x 200 mm, de type « mur en béton cellulaire », avec une circulation de « l'air en courant parallèle » dans l'espace annulaire. Par ailleurs, la surface de la section d'amenée d'air a été évaluée à 250 cm² ;
- Pour les sites n° 2, 3, 7, 10, 13, 14, 15, 18 et 19, il a été supposé un boisseau de type « mur en briques homogène (moyen) », avec une circulation de « l'air en courant parallèle » dans l'espace annulaire :
 - o Pour un boisseau de 200 mm x 200 mm pour les sites n° 3, 10, 13, 14, 15, 18 et 19 (ainsi que le n° 2, pour lequel l'information était fournie) ;
 - o Pour un boisseau de 250 mm x 250 mm pour le site n° 7 (pour lequel cette information était fournie) ;
- Pour le site n° 17, il a été supposé un boisseau de 200 mm x 200 mm, de type « mur en briques homogène (moyen) », avec de la « laine céramique » dans l'espace annulaire (puisque le candidat a indiqué avoir une isolation entre le tubage flexible et le boisseau) ;
- Pour l'ensemble des sites, à l'exception du site n° 1 (pour lequel l'information était disponible), il a été fait une hypothèse sur la marque et le modèle du terminal, en se basant sur les photos disponibles.

Notons que les calculs n'ont pas pu être effectués pour le site n° 9, compte tenu du fait que le particulier a déménagé avant les essais réalisés de manière ponctuelle (et donc des relevés sur site effectués par l'Ineris), de sorte que trop peu d'informations sur l'installation étaient disponibles.

Afin d'évaluer l'influence de la marque de conduit considérée dans les calculs (pour les conduits de raccordement et de fumée), une étude de sensibilité a été menée sur les simulations du site n° 1. Il en ressort qu'en remplaçant, dans les calculs, les conduits de la marque effectivement mis en place, par des conduits similaires d'une autre marque, la différence sur le résultat du calcul de $P_z - P_{ze}$ est très faible (0,5 Pa).

Pour autant, ce travail *a posteriori* et certaines des hypothèses appliquées laissent penser que l'incertitude sur ces calculs est relativement élevée.

Le détail des données utilisées dans les calculs, pour chaque site, a été fourni à l'ADEME.

6.3. Résultats obtenus & Analyse

Pour chaque site, deux calculs de dimensionnement ont été effectués, en considérant successivement :

- La valeur de tirage minimum à la buse (P_w) requis par le fabricant du poêle ;
- Une valeur de 0 Pa pour le tirage minimum requis à la buse (P_w).

En effet, il est admis par les experts du Groupe Spécialisé sur les « équipements / installations de combustion » (GS14.2) que pour les appareils munis d'un ventilateur d'extraction (tel que les poêles à granulés), le tirage à la buse peut être nul puisque les pertes de charge liées à l'appareil lui-même sont compensées par le ventilateur d'extraction des fumées.

Les résultats obtenus sont détaillés dans le *Tableau 23*, dans lequel les valeurs qui ne respectent pas les critères de la norme de dimensionnement des conduits NF EN 13384-1 (2019) sont repérées en gras et rouge, de même que les spécificités des conduits qui ne respectent pas les critères initialement définis dans le choix des sites.

| Candidat | Spécificité | Valeur de P_w = Valeur fabricant | | | | Valeur de $P_w = 0$ Pa | |
|----------|--|------------------------------------|--------------|-------------|--------------|------------------------|-------------|
| | | Nominal | | Réduit | | Nominal | Réduit |
| | | Pz-Pze (Pa) | tiob-tg (°C) | Pz-Pze (Pa) | tiob-tg (°C) | Pz-Pze (Pa) | Pz-Pze (Pa) |
| C1 | - | -4,3 | 32,4 | 4,3 | -5,7 | -1,3 | 4,6 |
| C2 | - | 1,7 | 25,0 | 4,2 | 7,3 | 4,7 | 4,5 |
| C3 | - | 1,9 | 24,2 | 4,3 | 7,5 | 4,9 | 4,6 |
| C4 | - | 3,6 | 56,7 | 2,9 | 25,6 | 6,6 | 5,9 |
| C5 | - | 0,1 | 44,5 | - | - | 0,1 | - |
| C6 | - | 3,5 | 56,8 | - | - | 8,5 | - |
| C7 | Conduit d'amenée d'air enterré | -10,0 | 35,3 | - | - | 2,0 | - |
| C8 | Conduit d'amenée d'air non raccordé | 8,6 | 17,8 | - | - | 9,6 | - |
| C9 | - | - | - | - | - | - | - |
| C10 | - | 2,1 | 23,0 | - | - | 7,1 | - |
| C11 | Conduit d'amenée d'air enterré (cf. plan) | -35,8 | 53,2 | - | - | -30,8 | - |
| C12 | Conduit Concentrique | -18,3 | 29,2 | - | - | -8,3 | - |
| C13 | - | 7,9 | 26,1 | - | - | 7,9 | - |
| C14 | - | 3,5 | 35,4 | - | - | 3,5 | - |
| C15 | Conduit d'amenée d'air non raccordé | 12,6 | 39,9 | - | - | 12,6 | - |
| C16 | Conduit d'amenée d'air enterré | -45,9 | 66,8 | 1,3 | 16,1 | -42,9 | 1,6 |
| C17 | - | 15,1 | 74,8 | - | - | 15,1 | - |
| C18 | - | -2,2 | 94,9 | - | - | 9,8 | - |
| C19 | - | -15,8 | 22,7 | 1,5 | 7,8 | -12,8 | 1,8 |
| C20 | Conduit d'amenée d'air débouchant dans le garage | -2,4 | 43,8 | 2,9 | 6,1 | 0,6 | 3,2 |

Tableau 23 : résultats des calculs de dimensionnement de conduit pour l'ensemble des sites.

Comme le montre ce tableau, le critère sur la température de la paroi intérieure du conduit de fumée au débouché est respecté pour l'ensemble des sites, en allure nominale. Ceci est cohérent avec les observations effectuées lors des mesures en non-continu, conduisant à une absence de condensats (pas d'égouttures visibles lors du démontage des conduits, pas d'écoulements constatés par les particuliers).

Pour les sites sur lesquels des données sur les caractéristiques du poêle à granulés en allure réduite sont disponibles, il apparaît que la valeur de t_{iob} est notablement plus faible dans ce mode de fonctionnement qu'en allure nominale. Ceci est lié à la plus faible température des fumées à cette allure. Pour autant,

d'après les résultats présentés au *Tableau 23*, seul le site n° 1 pourrait présenter un léger problème de condensation en extrémité haute du conduit pour cette allure de fonctionnement.

Rappelons toutefois que, pour les conduits résistants aux condensats (comme c'est le cas des conduits dédiés au chauffage au bois), la température critique en termes de condensation est considérée égale à 0 °C, de sorte qu'une condensation des composés dont la température d'ébullition est supérieure à cette valeur (en particulier les Composés Organiques Volatils et Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) est possible.

Sur la base des résultats obtenus pour la pression résiduelle au point de jonction entre le conduit de raccordement et le conduit de fumée ($P_z - P_{ze}$), il apparaît que huit sites ne respectent pas ce critère en allure nominale, en considérant la valeur de tirage minimum à la buse requis par le fabricant (sites n° 1, 7, 11, 12, 16, 18, 19 et 20). En appliquant une valeur de tirage minimum à la buse identique pour l'ensemble des sites, égale à 0 Pa, seuls les sites n°1, 11, 12, 16 et 19 ne respectent pas ce critère en allure nominale. Une comparaison entre les valeurs de $P_z - P_{ze}$ et les caractéristiques du conduit d'amenée d'air (*Figure 21*) met clairement en évidence une relation entre la longueur du conduit d'amenée d'air, ainsi que la présence d'une zone où l'air est ascendant, et le fait que l'installation ne soit pas conforme sur ce critère. Ceci est d'ailleurs cohérent avec les valeurs élevées de perte de charges liées à l'amenée d'air calculées via le logiciel Kesa-Aladin pour ces sites.

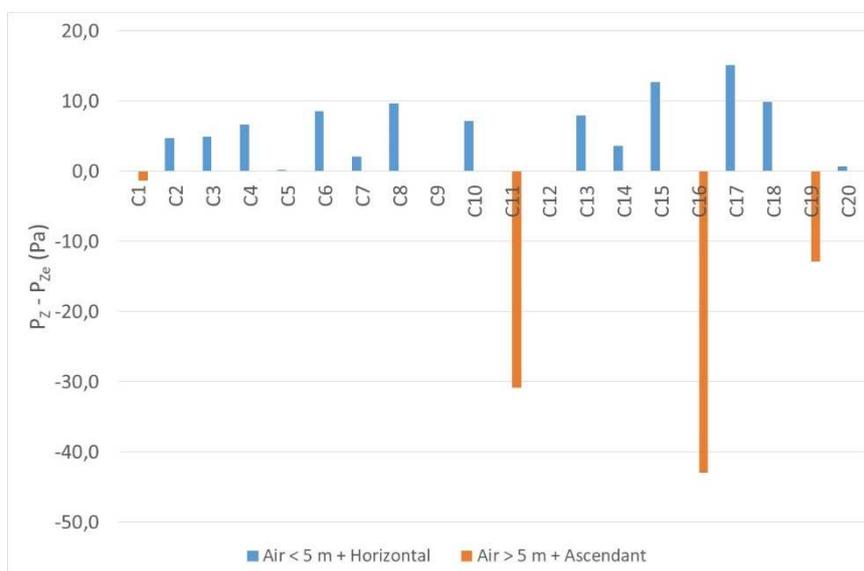


Figure 21 : valeurs de $P_z - P_{ze}$ des différents sites (hors sites n° 9 non calculé et 12 équipé d'un conduit concentrique) selon les caractéristiques du conduit d'amenée d'air.

En allure réduite, en revanche, quelle que soit la méthode de calcul, ce critère est respecté pour l'ensemble des sites, du fait en particulier du débit massique des fumées plus faible dans ces conditions de fonctionnement.

Le logiciel Kesa-Aladin fournit également les résultats du calcul de $P_z - P_{LU}$, avec P_{LU} la dépression environnementale. Bien que celle-ci ne soit pas clairement définie dans la norme NF EN 13384-1 (2019), elle correspond apparemment à la dépression dans le logement par rapport à la pression atmosphérique extérieure, de sorte que la valeur de $P_z - P_{LU}$ correspond approximativement au tirage tel qu'il est mesuré lors des mesures en continu pendant la saison de chauffe au cours de cette étude (et lors des essais normatifs). En effet, $P_z - P_{LU}$ correspond à la différence entre la pression au point de jonction raccordement / fumée et la pression dans le logement, tandis que le tirage est mesuré entre le conduit de raccordement (environ 1,5 m en-dessous du point de jonction raccordement / fumée) et le logement.

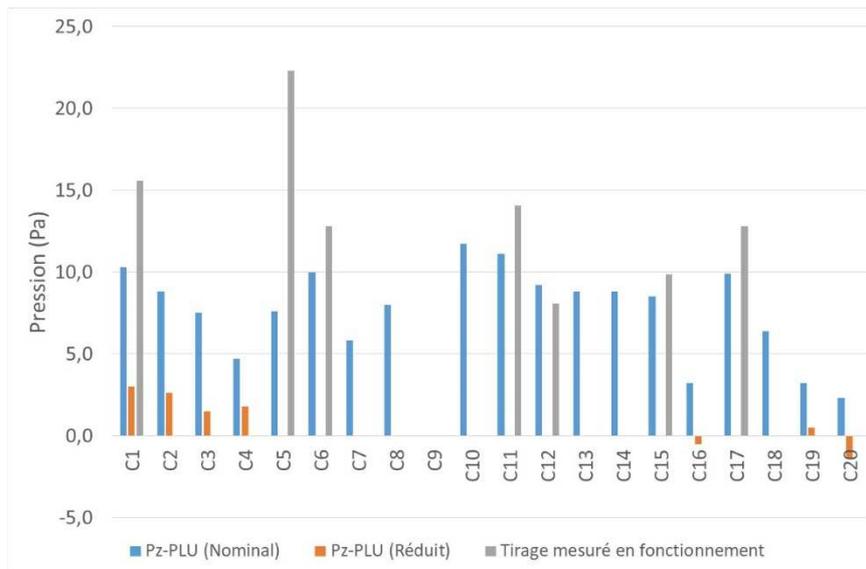


Figure 22 : comparaison des valeurs de $P_z - P_{LU}$ des différents sites (hors site n° 9 non calculé) avec le tirage mesuré lors des essais en continu sur une saison de chauffe (lorsque le poêle est en fonctionnement).

Comme le montre la *Figure 22*, la valeur de tirage mesurée au cours de cette étude pour les sites instrumentés avec un capteur de pression se révèle systématiquement plus élevée que la valeur de $P_z - P_{LU}$ calculée via le logiciel Kesa-Aladin, que ce soit en allure nominale ou en allure réduite. La différence de hauteur entre le point où est calculé $P_z - P_{LU}$ (point de jonction raccordement / fumée) et le point où est mesuré le tirage (dans le conduit de raccordement, environ 1,5 m en-dessous du point de jonction raccordement / fumée) ne semble pas pouvoir expliquer à elle seule cette différence, d'autant que la plupart des poêles testés lors de cette étude fonctionnent à puissance partielle (généralement P3), comme le confirment les taux de charge inférieurs à 100 % du Tableau 6. Le tirage mesuré devrait donc avoir une valeur comprise entre $P_z - P_{LU}$ en allure nominale (donc à puissance P5) et $P_z - P_{LU}$ en allure réduite (donc à puissance P1).

Ces constatations, ainsi que celles sur l'impact du conduit d'amenée d'air (*Figure 21*) suggèrent que, contrairement aux hypothèses de calcul de la norme NF EN 13384-1 (2019), le ventilateur d'extraction du poêle à granulés permet non seulement de compenser la perte de charge du poêle à granulés lui-même, mais également une partie (plus ou moins importante) de celle générée par le conduit d'amenée d'air. Ceci explique d'ailleurs que les poêles des sites n° 1, 11, 12, 16 et 19 présentent des performances tout à fait comparables à celles des autres sites, alors que selon les résultats du calcul du logiciel Kesa-Aladin, ils devraient dysfonctionner. Ce constat est en outre en accord avec les pratiques usuelles des installateurs qui ont généralement tendance à régler le ventilateur de manière à accentuer sa compensation des pertes de charges (en particulier lorsque la buse de l'amenée d'air a un diamètre inférieur à 60 mm ou que la longueur développée du conduit est élevée), pour s'assurer que la pression résiduelle au point de jonction entre le conduit de raccordement et le conduit de fumée soit au moins suffisante au fonctionnement de l'appareil. Cette pratique est à mettre en relation avec deux points :

- Le fait que les installateurs ne transmettent généralement pas de note de calculs de dimensionnement aux particuliers (de sorte que, hors contrôle dans le cadre du dispositif RGE, il n'est pas possible d'avoir la certitude que ce dimensionnement ait été correctement effectué) ;
- Le fait qu'il soit généralement considéré par les installateurs qu'une importante pression résiduelle au point de jonction entre le conduit de raccordement et le conduit de fumée n'a pas d'effet négatif sur le fonctionnement de l'appareil.

6.4. Limites des calculs de dimensionnement des conduits d'une façon générale

Comme évoqué dans le paragraphe précédent, les calculs de dimensionnement des conduits selon la norme NF EN 13384-1 (2019), et donc le logiciel Kesa-Aladin qui est basé sur cette méthodologie, présentent certaines limites :

- Le ventilateur d'extraction du poêle à granulés est supposé ne compenser que les pertes de charge de cet appareil. Or, ce ventilateur a généralement la capacité de compenser également une partie (plus ou moins importante) des pertes de charge générées par le conduit d'amenée d'air. Il semblerait donc pertinent d'intégrer dans ce calcul les niveaux de réglages du ventilateur, afin que l'installateur puisse ajuster ceux-ci en fonction des besoins de l'installation ;
- La norme NF EN 13384-1 (2019) définit une valeur seuil inférieure pour la pression résiduelle au point de jonction raccordement / fumée. Elle définit également une valeur seuil supérieure, qui n'est pas calculée dans tous les logiciels de dimensionnement de conduits (en particulier, elle n'est pas calculée dans le logiciel Kesa-Aladin). Ce calcul de valeur seuil supérieure suppose en outre que le fabricant fournisse une valeur maximale de tirage requis à la buse de l'appareil de chauffage, ce qui est rarement fait, d'autant que cette notion de valeur seuil supérieure est relativement récente (ajoutée en 2019 dans la norme). Pourtant, les résultats de cette étude mettent clairement en évidence un impact négatif de l'excès d'apport en air comburant sur les émissions (en particulier pour le CO). Il semblerait donc pertinent que cette valeur seuil supérieure soit systématiquement calculable (dans le logiciel) et calculée (par les installateurs), et donc que les données nécessaires à ce calcul soient systématiquement fournies (par les fabricants).

Pour les conduits résistants aux condensats (comme c'est le cas des conduits dédiés au chauffage au bois), généralement seule la condensation de l'eau est considérée comme critique (puisque la température seuil de la paroi intérieure du conduit de fumée au débouché est généralement prise égale à 0 °C, comme dans cette étude), de sorte qu'une condensation des Composés Organiques Volatils et Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques peut se produire dans le conduit. Il semble toutefois que ce point ne génère pas de problématique concrète *in-situ*.

7. Conclusions

Grâce à la réalisation de campagnes de mesures menées directement chez vingt particuliers, à d'autres allures et dans d'autres conditions que celles utilisées pour vérifier la conformité des appareils aux normes en vigueur, les performances d'appareils à granulés dans des conditions réelles de fonctionnement ont été caractérisées.

Ces mesures ont été effectuées sur des appareils récents (moins de cinq ans pour trois appareils, moins de trois ans pour dix-sept appareils), labellisés Flamme verte 7*, de 8 kW environ, utilisés en chauffage principal, situés dans différentes régions climatiques.

Afin de s'affranchir de la qualité du combustible, les granulés nécessaires au chauffage des logements durant l'ensemble de la saison de chauffe ont été fournis aux vingt particuliers volontaires pour participer à l'étude.

Ces logements ont été instrumentés durant l'ensemble d'une saison de chauffe avec différents capteurs (températures pièces de vie et de nuit, tirage, consommation électrique du poêle) afin de caractériser le fonctionnement, la consommation électrique et en granulés et le rendement énergétique de vingt poêles dans leurs environnements respectifs. Les valeurs relevées ont été récupérées quotidiennement par émission radio LoRa, exploitées et analysées.

Concernant les polluants, les mesures à l'émission des appareils ont été effectuées au cours de campagnes de mesures ponctuelles selon le protocole BeReal ainsi que dans des conditions réelles simulées (selon deux modes de fonctionnement des appareils : modulation et marche/arrêt), sur une période de deux jours environ sur chaque site. En supplément des granulés résineux consommés durant l'ensemble de la saison de chauffe, des granulés fabriqués à partir de feuillus ont aussi été testés afin de mieux cerner leurs spécificités en termes de combustion, pour potentiellement accroître à l'avenir la ressource nationale en lien avec la composition en essences de bois de la forêt française.

Les résultats des mesures en continu sur la période de chauffe font apparaître des durées de fonctionnement du poêle à granulés, ainsi que des puissances et taux de charge de l'appareil, très variables d'un site à l'autre (avec un facteur de 1 à 7 sur la durée et de 1 à 4 sur la puissance et le taux de charge). La consommation électrique de l'ensemble des poêles à granulés de l'échantillon étudié augmente de façon linéaire avec la durée de fonctionnement de l'appareil, ainsi qu'avec la température des fumées, excepté pour un site (où le conduit concentrique a dû être remplacé par un conduit simple paroi lors des mesures) pour lequel la consommation s'avère nettement supérieure à celle des autres sites pour une durée de fonctionnement similaire. Ainsi, pour une durée de fonctionnement et une température des fumées données, il y a visiblement peu de variation de la consommation électrique d'un poêle à l'autre, sauf en cas de mise en œuvre spécifique de l'appareil. Le rendement moyen sur la saison hivernale de l'ensemble des poêles à granulés de l'échantillon testé est de l'ordre de 85 %, avec très peu de variation d'un appareil à l'autre. En conséquence, comme attendu pour un appareil donné, la consommation en granulés de l'échantillon testé augmente de façon linéaire avec la durée de fonctionnement du poêle. Ces tendances sont observées sur l'ensemble de la période de chauffe, ainsi que lors de la journée la plus froide et sur la moyenne des trois journées typiques. La température de consigne dans le salon semble globalement bien régulée par le poêle à granulés pour la majorité des sites.

Concernant les mesures à l'émission, les résultats obtenus à allure nominale mettent en évidence :

- Des émissions de polluants nettement plus élevées que celles communiquées par les constructeurs et mesurées dans le cadre d'essais normatifs pour le CO (+ 450 %) ainsi que dans une moindre mesure pour les particules solides (+ 30 %), et sensiblement plus élevées que celles rapportées dans d'autres études réalisées en laboratoire ;
- Des rendements plus faibles (- 4,8 points) que ceux communiqués par les constructeurs et établis dans le cadre d'essais normatifs.

Une partie de ces différences s'explique par le fait que le fonctionnement « en allure nominale » défini dans le protocole BeReal diffère de celui défini dans les normes d'essais actuelles des poêles à granulés. En effet, les phases transitoires (allumage, mise en régime et extinction) de l'appareil sont intégrées à la mesure du protocole BeReal, alors que les mesures « en allure nominale » des protocoles normatifs actuels portent uniquement sur une phase établie de la combustion (après allumage et mise en régime). Pour autant, ces différences de protocole n'expliquent pas la totalité des écarts observés. En particulier, les

mesures effectuées sur un même modèle d'appareil, testé à plusieurs reprises, mettent en évidence des performances disparates selon les sites (jusqu'à + 400 % d'émissions de CO à allure réduite et perte de rendement allant de cinq points à allure nominale à dix points à allure réduite). Ces résultats confirment donc le rôle important de l'installation, notamment du dimensionnement des poêles à granulés, du dimensionnement des conduits et des réglages effectués lors de leurs mises en service, sur le fonctionnement et les performances des appareils.

Malgré cette dégradation des performances observée entre essais optimisés en laboratoire selon les protocoles normatifs actuels (avec mesures en régime établi) et essais en conditions réelles *in situ* selon un protocole incluant des phases transitoires, les niveaux d'émission de polluants mesurés restent faibles pour plus des deux tiers des appareils testés, avec des facteurs d'émission en énergie entrante inférieur à 630 g/GJ en CO et à 25 g/GJ en particules solides quelle que soit l'allure de fonctionnement des appareils. Les rendements énergétiques restent élevés, de l'ordre de 85 %. Les autres appareils disposent de performances toutes aussi élevées à des allures soutenues (plus de 40 % de la puissance nominale) mais bien plus faibles à allures plus réduites (facteurs d'émission en CO exprimés en énergie entrante compris entre 1000 et 1800 g/GJ, rendements inférieurs à 80 %), utilisées notamment lorsque les poêles modulent ou lorsque ces derniers sont surdimensionnés. Ces dysfonctionnements sont liés à des débits d'air comburant inadaptés à la charge de combustible introduite (excès d'air élevé), provenant de mauvais réglages de l'appareil, du fait d'un dimensionnement des conduits (amenée d'air, conduit de raccordement, conduit de fumée) inapproprié.

Il est ainsi important de communiquer auprès des installateurs et des particuliers qu'un tirage trop élevé est tout aussi néfaste pour l'installation de chauffage (vis-à-vis de la combustion) qu'un tirage trop faible, et ce d'autant que la norme NF EN 13384-1 (2019) ne définit pas de valeur limite supérieure pour le tirage. Il est également important d'inciter les installateurs à effectuer systématiquement un calcul de dimensionnement des conduits et de les former sur les outils correspondants.

En outre, il semble que les dysfonctionnements liés à un excès d'air trop élevé soient aussi à relier à une non-prise en compte de l'impact du réglage du ventilateur d'extraction des fumées sur la combustion (par les normes de dimensionnement, les fabricants, les installateurs, etc.). En effet, le ventilateur d'extraction du poêle à granulés est généralement utilisé pour compenser conjointement les pertes de charge liées à l'appareil lui-même (tel que cela est prévu dans les calculs de dimensionnement des conduits), mais également une partie (plus ou moins importante) des pertes de charge générées par le conduit d'amenée d'air. Il semblerait donc pertinent de rendre beaucoup plus transparents (dans les calculs de dimensionnement de conduits, dans les notices d'installation des appareils) les niveaux de réglages du ventilateur, afin que l'installateur puisse ajuster ceux-ci en fonction des besoins réels de l'installation.

Dans les conditions de tests retenues pour cette étude, il n'a pas été mis en évidence de différences notables en termes de performances énergétiques et environnementales entre les modes de fonctionnement des appareils :

- En mode modulation à différentes puissances, les appareils fonctionnent à la puissance sélectionnée (généralement le niveau P3) puis basculent à une puissance plus faible (généralement P1) lorsque la température de consigne est atteinte. Lorsque la combustion à allure réduite n'est pas suffisamment bien maîtrisée, les résultats sont particulièrement impactés par la durée de fonctionnement à cette allure qu'il convient de minimiser. Pour cette raison, nous ne recommandons pas l'utilisation de ce mode modulation lorsque le besoin en chauffage est limité (périodes avec une météo clémente, inter-saisons), même si pour deux tiers des appareils la combustion à allure réduite est relativement bien optimisée ;
- En mode marche/arrêt, quel que soit le niveau de puissance de chauffe sélectionné, les émissions de polluants sont particulièrement impactées par les phases d'allumage (émettrice de CO et de particules solides) et d'arrêt (émettrice de CO du fait du lancement d'un cycle de nettoyage du creuset nécessaire pour finir de brûler la charge de granulés restante et parfaire l'allumage suivant). De ce fait, les émissions seront d'autant plus fortes que la période de marche sera courte. Il convient donc de maximiser cette durée de fonctionnement.

Quel que soit le mode d'utilisation retenu, le facteur clef permettant de minimiser les émissions est le bon dimensionnement de l'appareil, afin que celui-ci puisse compenser les déperditions thermiques de la surface chauffée avec un fonctionnement majoritaire à puissance nominale. Or il a été constaté que la plupart des poêles testés sont réglés pour fonctionner à puissance intermédiaire (~ 65 % de la puissance

nominale) dans les conditions usuelles d'utilisation. En supposant qu'il s'agisse là d'un choix pour garantir à l'utilisateur de disposer d'une capacité de chauffage « résiduelle » en cas d'hiver particulièrement froid (hypothèse qui reste à confirmer puisque très peu de logements parmi ceux de cette étude ont bénéficié d'une étude thermique complète), la question de la définition de l'allure nominale est peut-être à réévaluer. *A minima*, il paraîtrait dans ce cas nécessaire que les essais normatifs incluent des essais à ce niveau de puissance « le plus couramment utilisé ».

Malgré l'usage d'appareils non optimisés sur la combustion de granulés feuillus, les émissions de CO et particules solides issues de leur combustion sont à peine supérieures à celles des granulés résineux ; la différence étant non statistiquement significative. Seules les émissions de NO_x sont significativement différentes entre ces deux types de granulés du fait de leurs teneurs respectives en azote. Pour ces deux combustibles, les rendements énergétiques déterminés sont comparables.

Les flux de polluants émis estimés durant une saison de chauffe fluctuent fortement en fonction des quantités de combustibles consommées qui varient de 0,42 à 2,37 t selon les sites étudiés et qui dépendent notamment des caractéristiques des logements (isolation et volume à chauffer), de leurs situations géographiques ainsi que du mode de vie des habitants. Ils sont compris entre 1,1 et 24,5 kg pour le CO, 0,7 et 3,7 kg équivalent NO₂ pour les NO_x et 0,06 à 0,50 kg pour les particules solides.

En conclusion, les performances intrinsèques des poêles à granulés sont élevées mais leurs fonctionnements en conditions réelles restent perfectibles. Ils pourraient être améliorés :

- En ajustant la puissance de l'appareil au besoin en chauffage du logement ;
- En s'assurant que les performances énergétiques et environnementales de l'appareil soient testées à la puissance recommandée (ou réglée par défaut) par le fabricant, qui doit correspondre à celle le plus fréquemment utilisée par le particulier ;
- Et en adaptant le dimensionnement des conduits et les réglages lors de la mise en service de sorte que le tirage de l'installation soit suffisant pour éviter tout refoulement des fumées dans le logement ou apport d'air comburant insuffisant dans l'appareil, tout en limitant le tirage pour éviter un apport excessif en air comburant, également néfaste pour la combustion. Ce point suppose un travail conjoint des installateurs et fabricants pour mieux prendre en compte les pertes de charge de l'installation dans son ensemble (appareil et conduits) et la capacité du ventilateur d'extraction à compenser une partie de ces pertes de charge.

SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|-----------------------|---|
| ADEME | Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie |
| CEN | Comité Européen de Normalisation |
| CEREN | Centre d'Etudes et de Recherches Economiques sur l'Énergie |
| CO | Monoxyde de carbone |
| CO₂ | Dioxyde de carbone |
| CSTB | Centre Scientifique et Technique du Bâtiment |
| Ea | Excès d'air |
| ECS | Eau chaude sanitaire |
| INERIS | Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques |
| m³ | Normal mètre cube |
| NO_x | Oxydes d'azote |
| PCI | Pouvoir calorifique inférieur |
| PM | Particule matter (matière particulaire) : particules solides uniquement |
| Pn | Puissance nominale (donnée constructeur) |
| Ps | Puissance sortante, utile ou délivrée |
| Tf | Température des fumées (en °C) |
| η | Rendement énergétique (en %) |

BIBLIOGRAPHIE

- Ademe, 2020. Enquête sur les prix des combustibles bois en 2019-2020. <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/4450-enquete-sur-les-prix-des-combustibles-bois-en-2019-2020.html>.
- Afsset, 2009. Pollution par les particules dans l'air ambiant. Synthèse des éléments sanitaires en vue d'un appui à l'élaboration de seuils d'information et d'alerte du public pour les particules dans l'air ambiant. Mars 2009. Avis de l'Agence française de sécurité sanitaires de l'environnement et du travail (Afsset) Rapport d'expertise collective.
- Commission européenne, 2005. Stratégie thématique sur la pollution atmosphérique. Communication 446 du 21 septembre 2005. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=LEGISSUM:l28159>
- Båfver, L.S., Leckner, B., Tullin, C., Berntsen, M., 2011. Particle emissions from pellets stoves and modern and old-type wood stoves. *Biomass Bioenergy* 35, 3648e3655.
- Boman, C., Pettersson, E., Westerholm, R., Boström, D., Nordin, A., 2011. Stove performance and emission characteristics in residential wood log and pellet combustion, Part 1: pellet stoves. *Energy & Fuels* 25, 307e314.
- Fachinger, F., Drewnick, F., Gieré, R., Borrmann, S., 2017. How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: Emission factors for different fuels and burning conditions. *Atmos. Environ.* 158, 216e226.
- Ineris, 2018. Synthèse des études à l'émission réalisées par l'Ineris sur la combustion du bois en foyers domestiques. Document téléchargeable sur www.ineris.fr.
- Johansson, L.S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C., Potter, A., 2004. Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmos. Environ.* 38, 4183e4195.
- Lamberg, H., Sippula, O., Tissari, J., Jokiniemi, J., 2011. Effects of air staging and load on fine-particle and gaseous emissions from a small-scale pellet boiler. *Energy & Fuels* 25, 4952e4960.
- Observ'Er, 2022. Suivi du marché 2021 des appareils domestiques de chauffage au bois. Observatoire des énergies renouvelables, mars 2022.
- Santé publique France, communiqué publié le 14 avril 2021. <https://www.santepubliquefrance.fr/presse/2021/pollution-de-l-air-ambiant-nouvelles-estimations-de-son-impact-sur-la-sante-des-francais>.
- Secten, 2022. Le rapport de référence sur les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France. <https://www.citepa.org/fr/secten/>.

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique - nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols, etc., nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



PERFORMANCES REELLES DE POELES A GRANULES

Des campagnes de mesures ont été menées chez vingt particuliers chauffés à l'aide d'un poêle à granulés. Les résultats de ces campagnes ont permis de caractériser en conditions réelles les performances énergétiques et environnementales des installations étudiées : consommations, rendements énergétiques, émissions de polluants (monoxyde de carbone, particules fines solides, oxydes d'azote).

Les performances intrinsèques des poêles à granulés sont élevées, mais leur fonctionnement en conditions réelles reste perfectible. Des recommandations à destination des différents acteurs de la filière (fabricants d'appareils, installateurs, utilisateurs, rédacteurs des normes) ont été formulées. Elles mettent notamment en avant l'importance d'ajuster la puissance de l'appareil au besoin en chauffage du logement et du bon dimensionnement des conduits de fumées.

Les ventes de poêles à granulés ont beaucoup augmenté ces dernières années mais leurs performances énergétiques et environnementales réelles ont été peu étudiées jusqu'à présent.

Cette étude montre que les performances intrinsèques des poêles à granulés sont élevées, mais leur fonctionnement en conditions réelles reste perfectible.

