

École polytechnique de Louvain

Le poêle de masse comme solution écologique : sélection de matériaux, impact environnemental et aspects socio-techniques

Auteur: **Bertrand ANCIAUX**

Promoteurs: **Tom DEDEURWAERDERE, Pascal JACQUES, Thomas PARDOEN**

Lecteur: **Geoffrey VAN MOESEKE**

Année académique 2023–2024

Master [120] : ingénieur civil électromécanicien

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl

Table des matières

Table des matières	i
Résumé	iv
Remerciements	v
Nomenclature	vi
1 Introduction	1
1.1 Qu'est-ce qu'un poêle de masse?	1
1.2 Pourquoi se chauffer avec un poêle de masse?	2
2 Sélection de matériaux pour l'accumulateur d'un poêle de masse	4
2.1 Mise en contexte	4
2.1.1 Contexte de l'application et fonctions principales du matériau	4
2.1.2 Description des contraintes	5
2.1.3 Critères de sélection	5
2.2 Formulation du problème	6
2.2.1 Les deux modes de transfert de chaleur du poêle vers l'environnement	6
2.2.2 Formulation mathématique des contraintes	7
2.3 Hypothèses	9
2.3.1 Configuration de l'accumulateur	9
2.3.2 Modélisation simplifiée de la combustion	9
2.3.3 Aéraulique du problème négligée	10
2.3.4 Champ de température unidimensionnel	10
2.3.5 Température constante de l'environnement autour du poêle	12
2.3.6 Remplacement du rayonnement par une convection surestimée	12
2.4 Résolution du problèmes aux conditions limites	14
2.4.1 Conditions limites de la phase de stockage	15
2.4.2 Résolution de la phase de stockage	15

2.4.3	Conditions limites de la phase de restitution	20
2.4.4	Résolution de la phase de restitution	20
2.4.5	Récapitulatif	22
2.5	Résultats attendus	22
2.6	Discussion des résultats	23
2.6.1	Matériaux conformes aux exigences	23
2.6.2	Résultats pour les différents matériaux	24
2.6.3	Valeurs des critères pour les différents matériaux	29
2.6.4	Compromis entre les deux critères de sélection	29
3	Impact environnemental d'un poêle de masse	32
3.1	Méthodologie	32
3.1.1	Description du cas d'étude	32
3.1.2	Définition de l'ACV	33
3.1.3	Objectifs de l'étude	34
3.1.4	Champs de l'étude	34
3.1.5	Hypothèses	36
3.2	Inventaire du cycle de vie	38
3.2.1	Cycle de vie du poêle	38
3.2.2	Cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur	40
3.3	Evaluation des impacts	42
3.3.1	Cycle de vie du poêle	42
3.3.2	Cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur	42
3.4	Résultats	44
3.4.1	Cycle de vie du poêle	44
3.4.2	Cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur	44
3.4.3	Répartition de l'impact environnemental des différents processus du cycle de vie total	45
3.5	Analyse de sensibilité	46
3.5.1	Alternative dans les matériaux	46
3.5.2	Niveau de mécanisation de l'activité forestière	47
3.5.3	Transport	48
3.6	Comparaison avec d'autres systèmes de chauffage	51
3.6.1	Pompe à chaleur	51
3.6.2	Chaudière à gaz	51
3.6.3	Poêle traditionnel	52
3.6.4	Discussion des résultats	52
3.7	Pollution atmosphérique des systèmes de chauffage au bois	54
3.7.1	Polluants atmosphériques issus de la combustion du bois	54
3.7.2	Impact du chauffage domestique au bois sur la pollution atmosphérique globale	56

3.7.3	Moyens de réduction des émissions de polluants atmosphériques	59
4	Aspects socio-techniques autour du poêle de masse	63
4.1	Confort thermique avec un poêle de masse	64
4.1.1	Définition du confort thermique	64
4.1.2	Le poêle de masse : un système basse température	65
4.1.3	Problématique des pièces périphériques	65
4.1.4	Projet SlowHeat	66
4.1.5	Le poêle de masse combiné à la démarche SlowHeat	68
4.2	Analyse des pratiques socio-techniques des différents systèmes de chauffage	70
4.2.1	Spécificités logistiques	70
4.2.2	Spécificités opérationnelles	71
4.2.3	Spécificité d'usage du combustible	72
4.2.4	Conséquences des spécificités sur l'utilisation	73
4.3	L'Association Française du Poêle Maçonnerie Artisanale : une communauté de pratique qui fait émerger la profession de poêlier	74
4.3.1	Communauté de pratique : définition	75
4.3.2	Entretiens avec des experts-praticiens de la communauté de pratique	76
4.3.3	Différents soutiens de l'AFPMA envers la profession	77
4.3.4	Évaluation de l'AFPMA en tant que communauté de pratique	81
4.3.5	Bilan de mon déplacement à Montendre	82
A	Script Python pour le champ de température dans l'accumulateur	86
B	Questionnaire qualitatif sur l'usage du poêle de masse	91
C	Norme NF EN 15544	95
D	Laboratoire de recherche de l'AFPMA	97
	Bibliographie	101

Résumé

Ce travail de fin d'études explore les dimensions techniques, environnementales et socio-techniques liées au poêle de masse. Il est structuré en trois chapitres principaux.

Le premier chapitre se concentre sur la sélection de matériaux pour l'accumulateur de chaleur d'un poêle de masse, en prenant en compte à la fois l'empreinte carbone et le coût financier.

Le second chapitre évalue l'impact environnemental du chauffage résidentiel au moyen d'un poêle de masse, en examinant les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques. Ces impacts sont ensuite comparés avec d'autres systèmes de chauffage.

Le troisième chapitre traite des aspects socio-techniques autour du poêle de masse. Il aborde la manière dont le confort thermique peut être obtenu avec ce type de poêle. Ensuite, une analyse des pratiques d'utilisation de celui-ci est réalisée. Elle intègre des retours d'expérience d'utilisateurs, recueillis dans le cadre de cette étude. Ce chapitre décrit également le fonctionnement de l'association qui contribue à l'évolution du métier de poêlier, sur base d'un séjour d'observation et d'échange de 4 jours au sein de cette structure.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Tom Dedeurwaerdere, au Professeur Thomas Pardoën, ainsi qu'au Professeur Pascal Jacques pour avoir accepté de superviser ce mémoire. Leurs conseils éclairés sur la direction à prendre ont été indispensables à la réalisation de ce travail.

Je souhaite également adresser mes sincères remerciements à Audrey Favache et à Pierre Bollen pour leur supervision tout au long de l'année. Le temps qu'ils m'ont consacré ainsi que leurs nombreux conseils ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire. Un remerciement spécial à Audrey pour sa relecture attentive.

Je remercie chaleureusement l'AFPMA pour l'accueil qu'ils m'ont réservé lors des quatre jours très enrichissants passés à Montendre au sein de leur association.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance envers ma famille pour leur soutien indéfectible tout au long de mes cinq années à l'EPL. Un remerciement particulier à ma grand-mère pour ses délicieux plats réconfortants durant la rédaction de ce mémoire, ainsi qu'à ma maman et à ma sœur pour les nombreuses relectures qu'elles ont effectuées.

Nomenclature

ADEME Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AFPMA Association française du poêle maçonné artisanal

CO Monoxyde de carbone

COV Composés Organiques Volatiles

HAP Hydrocarbures aromatiques polycycliques

PAC Pompe à Chaleur

PCI Pouvoir calorifique inférieur

PM Particulate matters (micro-particules)

PM1 Micro-particule inférieure à 1 μm

PM2.5 Micro-particule inférieure à 2,5 μm

PM10 Micro-particule inférieure à 10 μm

PRG Potentiel de réchauffement global

Chapitre 1

Introduction

1.1 Qu'est-ce qu'un poêle de masse ?

Un poêle de masse est un système de chauffage basé sur la combustion de bois. La figure [1.1](#) présente un schéma détaillé de ce type d'installation dans une habitation. Ce système se compose de plusieurs parties, parmi lesquelles on trouve :

- **Prise d'air extérieure** : elle permet d'amener l'air nécessaire à la combustion depuis l'extérieur. Elle dispose d'un clapet ajustable qui permet de réguler le débit.
- **Foyer** : C'est l'endroit où a lieu la combustion du bois. Il est designé de façon à ce que la combustion ait le meilleur rendement possible. Il est généralement maçonné en briques réfractaires et comporte des dimensions précises afin d'optimiser le processus de combustion. Pour faciliter la maçonnerie, l'injection d'air dans le foyer est généralement assurée par la porte de celui-ci qui est usinée par des fabricants.
- **Accumulateur de chaleur** : il emmagasine la chaleur produite lors de la combustion. Cet accumulateur est constitué de conduits appelés carnaux, dans lesquels circulent les fumées après la combustion. Ceux-ci sont enveloppés par un matériau qui forme l'accumulateur. Un échange de chaleur a lieu entre les fumées et ce matériau qui la stocke et la diffuse à l'environnement.
- **Fumisterie d'évacuation** : assure l'évacuation des fumées de la sortie des carnaux jusqu'à l'extérieur de l'habitation.

La particularité du poêle de masse par rapport au poêle traditionnel réside dans sa capacité à restituer la chaleur de manière douce pendant une longue durée, malgré une combustion brève d'une quantité importante de bois. Cela est rendu possible grâce à l'accumulateur, et plus précisément aux propriétés du matériau qui le compose. Plus l'accumulateur est massif, plus la durée de restitution est

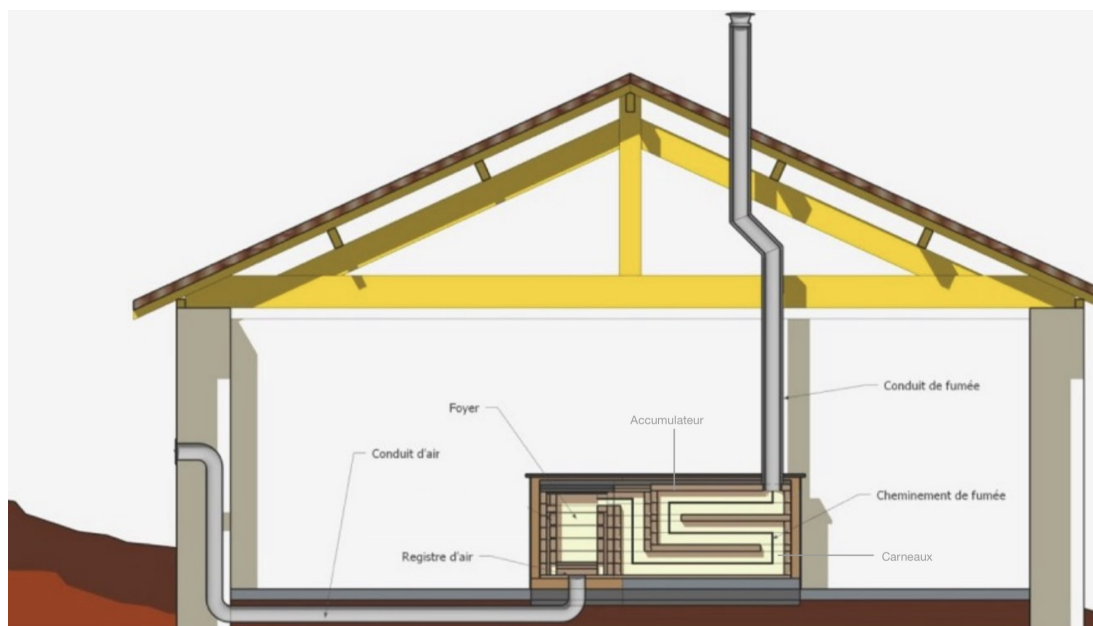


FIGURE 1.1 – Coupe horizontale du domaine étudié

longue. Cela rend également le poêle moins réactif. La masse de ce type de poêle est d'ailleurs une de ces particularités. Les plus petits modèles pèsent environ 1000 kg tandis que les plus grands peuvent atteindre jusqu'à 3000 kg.

Il existe deux types de poêles de masse :

- **Poêle artisanal** : il est conçu sur mesure par un poêlier, selon les besoins spécifiques du client. Il est donc dimensionné pour s'adapter parfaitement à la maison qu'il occupera, tout en tenant compte des besoins de ses habitants. Ce type de poêle offre également une grande diversité esthétique.
- **Poêle en kit** : proposé par des fabricants, il est livré avec les matériaux nécessaires ainsi qu'un plan de montage. Bien qu'il soit moins flexible qu'un poêle artisanal, il est plus abordable. Il peut être assemblé par soi-même ou avec l'aide d'un poêlier.

1.2 Pourquoi se chauffer avec un poêle de masse ?

Selon le Green Deal européen [1], l'objectif central est de réduire les émissions nettes de gaz à effet de serre de l'Union européenne d'au moins 55 % d'ici 2030, avec l'ambition d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.

Comme le rapporte le document [4], le chauffage des locaux en Belgique re-

présentait 74,4 % de la consommation totale d'énergie des ménages en 2021. Cela démontre que le chauffage des espaces représente une part significative de cette consommation, ayant ainsi un impact majeur sur les émissions de gaz à effet de serre des ménages. Par conséquent, la fin des systèmes de chauffage utilisant encore des combustibles fossiles est essentielle pour atteindre les objectifs climatiques. L'interdiction prévue en Wallonie d'installer de nouvelles chaudières à mazout d'ici 2025 [2] est un premier pas important. En Flandre, cette interdiction est déjà en vigueur depuis janvier 2022, et elle sera étendue aux chaudières à gaz dès 2025 [3].

Pour remplacer ces chaudières fonctionnant aux combustibles fossiles, une solution est l'utilisation de pompes à chaleur. Cependant, le remplacement des combustibles fossiles par une électrification ne concerne pas seulement le chauffage résidentiel, mais s'étend également à d'autres secteurs tels que le transport et l'industrie. Pour limiter la pression sur la demande en électricité, le chauffage au bois, en tant que source d'énergie renouvelable, représente une alternative intéressante.

Pour valoriser pleinement le bois en tant que combustible renouvelable, il est essentiel d'utiliser un appareil de chauffage performant. La combustion du bois est un processus complexe qui requiert des conditions optimales pour être efficace. Si elle est effectuée dans un appareil non-performant, la combustion peut entraîner un faible rendement énergétique et générer une quantité importante de polluants atmosphériques. Par conséquent, afin que le bois devienne une véritable alternative aux combustibles fossiles, il est indispensable d'opter pour des systèmes de chauffage qui assurent une combustion propre et efficace.

Le poêle de masse est un appareil qui valorise efficacement le bois comme combustible renouvelable. Grâce à sa conception, il assure une combustion propre et une restitution lente de la chaleur, maximisant ainsi le rendement énergétique tout en minimisant les émissions de polluants. Dans l'article [5], l'ADEME décrit ce type de poêle comme suit : « Aussi appelé "poêle de masse" ou "poêle à restitution lente de chaleur", ce type de poêle est le plus performant à l'usage. ».

Chapitre 2

Sélection de matériaux pour l'accumulateur d'un poêle de masse

Structure Chapitre 2

- (1) Mise en contexte
- (2) Formulation du problème
- (3) Hypothèses
- (4) Résolution du champ de température
- (5) Résultats

2.1 Mise en contexte

2.1.1 Contexte de l'application et fonctions principales du matériau

Dans ce qui va suivre, nous allons nous intéresser à la sélection de matériaux pour la conception d'un poêle de masse. Plus spécifiquement, cette sélection concerne l'accumulateur du poêle. L'accumulateur de chaleur est l'élément clef du poêle de masse. C'est grâce aux propriétés spécifiques du matériau qui le constitue qu'il peut emmagasiner la chaleur captée durant une flambée intense et relativement courte, pour ensuite la restituer sur une longue période.

Une première fonction du matériau est de pouvoir stocker la chaleur émise par une flambée d'une durée limitée. Ensuite, il doit la restituer de façon lente.

2.1.2 Description des contraintes

La fonction d'accumulation et de restitution lente de chaleur de notre matériau constituant l'accumulateur va se traduire par des contraintes à respecter. Celles-ci concernent le flux de chaleur que le poêle fournit à l'environnement dans lequel il évolue. La durée du cycle sur lequel il est évalué est de 12 heures. Cela comprend une combustion de 18 kg de bois dont la durée est estimée à 2 heures.

La première contrainte concerne la réactivité du poêle. En effet l'accumulateur, au bout d'un certain temps relativement court par rapport à son cycle de fonctionnement, doit atteindre une certaine puissance. Celle-ci doit être d'au moins 5 kW.

Ensuite, il est nécessaire que le flux de chaleur sortant du poêle reste au-dessus d'une certaine puissance tout au long de son cycle de fonctionnement. Cette valeur minimale est de 2 kW.

Ces deux contraintes ont été établies en se basant sur la courbe de puissance d'un poêle de taille moyenne, qui se trouve dans la fiche technique du modèle Medi Batchblock [31] de Uzume.

2.1.3 Critères de sélection

Dans cette section, nous allons examiner les critères de sélection pour choisir le matériau optimal pour notre poêle de masse. Deux principaux critères seront pris en compte :

- **Empreinte carbone de la production** : Nous évaluerons l'empreinte carbone [kgCO₂.eq] de chaque matériau, c'est-à-dire la quantité de dioxyde de carbone émise pour produire la quantité minimale requise de chaque matériau.
- **Coût financier** : En parallèle, nous estimerons le coût financier [€] correspondant à la quantité minimale nécessaire de chaque matériau.

En combinant ces deux critères, nous pourrions effectuer une sélection équilibrée et responsable, en tenant compte à la fois de l'impact environnemental¹ et des considérations économiques.

1. Bien que l'impact sur l'environnement ne se résume pas aux émissions de gaz à effet de serre

2.2 Formulation du problème

2.2.1 Les deux modes de transfert de chaleur du poêle vers l'environnement

Le transfert de chaleur du poêle vers l'environnement se produit à l'interface entre celui-ci et l'air ambiant. Il a lieu grâce à deux phénomènes qui se produisent parallèlement : la convection et le rayonnement. Ce transfert est influencé par la différence de température entre la surface extérieure de l'accumulateur et celle de l'environnement. En effet, la température influence non seulement le flux de chaleur total transmis par le poêle, mais également la proportion émise par convection et par rayonnement.

Convection :

Dans le cadre du poêle de masse, à moins qu'un ventilateur ne soit installé à proximité, le type de convection rencontré est la convection naturelle. Pendant ce processus, l'air initialement au repos reçoit de la chaleur de l'accumulateur. Devenant moins dense, l'air chaud monte, tandis que l'air plus frais descend pour être chauffé à son tour. Ce mouvement de montée et de descente crée des courants de convection naturelle. Le flux de chaleur transmis par convection peut être quantifié à l'aide de la relation suivante :

$$q_{conv} = \bar{h}_{conv} \cdot (T - T_0) \quad (2.1)$$

où :

- $\bar{h}$ est le coefficient moyen² de transfert de chaleur par convection,
- T est la température de surface de l'accumulateur en,
- T_0 est la température ambiante de l'environnement autour de l'accumulateur.

Rayonnement :

En ce qui concerne le rayonnement, il s'agit d'un processus par lequel la chaleur est transférée sous forme d'ondes électromagnétiques, de longueur d'onde allant de 0.1 μm à 100 μm . Ce mécanisme de transfert de chaleur ne nécessite pas de fluide dans lequel se propager, ce qui le distingue du processus de convection décrite ci-dessus. Le flux de chaleur transmis par rayonnement est quantifiable au moyen de la relation suivante :

$$q_{ray} = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \quad (2.2)$$

où :

2. Le calcul de cette valeur sera discuté plus tard.

- ϵ est l'émissivité comprise entre 0 et 1. Il s'agit d'une mesure de l'efficacité avec laquelle une surface émet de l'énergie sous forme de rayonnement thermique,
- $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ est la constante de Stefan-Boltzmann,
- T est la température de surface de l'accumulateur,
- T_0 est la température ambiante de l'environnement autour de l'accumulateur.

Influence de la température sur le mode de transfert

Comme expliqué précédemment, la proportion des deux modes de transfert de chaleur dépend de la température de l'interface où a lieu le transfert. La figure 2.1 indique le pourcentage du transfert par rayonnement en fonction de la température de surface dans le cas d'un matériau avec une émissivité $\epsilon = 0,9$, et d'une température ambiante constante de 288,15 K. Le pourcentage moyen de rayonnement pour les températures de surfaces comprises entre 20 °C et 100 °C est d'environ 55 %. C'est la valeur que nous allons retenir.

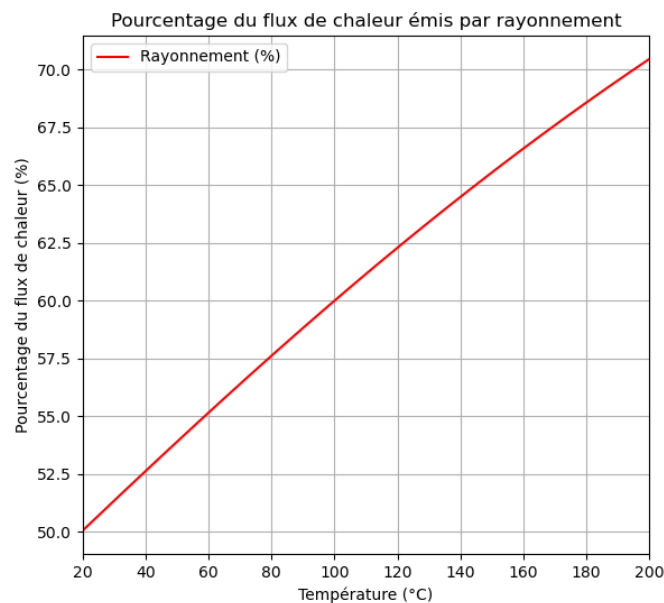


FIGURE 2.1 – Influence de la température sur le mode de transfert de chaleur

2.2.2 Formulation mathématique des contraintes

Comme nous l'avons vu précédemment, les contraintes que doit respecter le poêle concerne la puissance, notée Q , que l'accumulateur transfère à l'environne-

ment. Ainsi, les deux conditions suivantes doivent être respectées :

1. Durant tout le cycle de fonctionnement du poêle, il faut que la condition suivante soit respectée :

$$Q > 2 \text{ kW} \quad (2.3)$$

2. A la fin de la phase de combustion, il faut que :

$$Q \geq 5 \text{ kW} \quad (2.4)$$

Nous verrons plus tard dans les hypothèses faites en [2.3.1](#) que la configuration de l'accumulateur font que, peu importe l'épaisseur du matériau constituant l'accumulateur, la surface d'échange avec l'environnement reste constante. Celle-ci est de 8 m^2 . La puissance Q transférée par l'accumulateur à l'environnement est donnée par :

$$Q = q \cdot A_e \quad (2.5)$$

où :

- q est le flux de chaleur sortant de l'accumulateur,
- A_e est la surface d'échange de chaleur entre le poêle et l'environnement.

De la contrainte sur la puissance de l'accumulateur, on peut passer à une contrainte sur le flux de chaleur :

$$q > 0,25 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad \text{durant tout le cycle de fonctionnement} \quad (2.6)$$

$$q \geq 0,625 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad \text{à la fin de la phase de combustion} \quad (2.7)$$

Comme le montrent les équations [\(2.1\)](#) et [\(2.2\)](#), le flux de chaleur transmis par l'accumulateur est lié à la température en surface de celui-ci. Il est donc nécessaire de pouvoir dériver l'expression de le champ de température dans le matériaux qui constitue l'accumulateur. Cela passe par la résolution de l'équation de diffusion de la chaleur dans un solide :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.8)$$

où :

- $T = T(x, y, z, t)$ est le champ de température dans l'accumulateur,
- α est la diffusivité thermique du matériau.

2.3 Hypothèses

Pour résoudre l'équation aux dérivées partielles de la diffusion de chaleur dans un solide qui est décrite en [2.8](#), nous allons poser plusieurs hypothèses.

2.3.1 Configuration de l'accumulateur

La configuration que nous allons considérer pour cette sélection de matériaux est très simplifiée et n'est pas représentative de celle que l'on retrouve dans les poêles de masse. Elle ne consiste qu'en un carneau de section carrée vertical, formant ainsi un prisme à base carrée. Ce carneau est entouré du matériau accumulateur. Cette configuration est représentée à la figure [2.2](#).

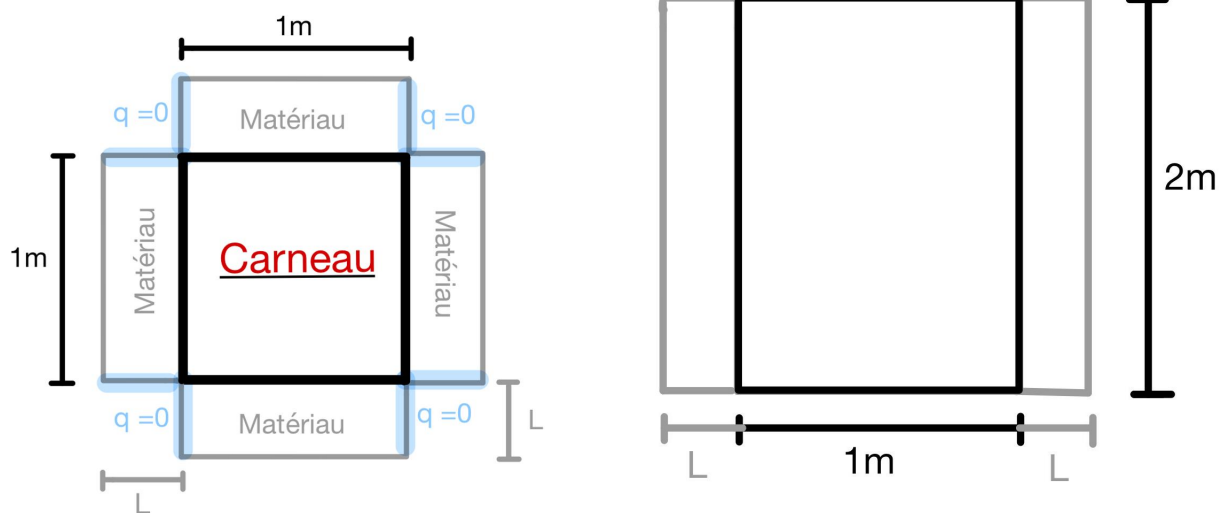


FIGURE 2.2 – Coupe horizontale (gauche) et coupe verticale (droite) du poêle

2.3.2 Modélisation simplifiée de la combustion

La combustion considérée se déroule sur une durée de 2 heures pendant laquelle 18 kilogrammes de bois sont brûlés. Le PCI considéré est celui du hêtre à 20 % d'humidité, et est de $13.42 \left[\frac{MJ}{kg} \right]$.

Nous considérons que la combustion se produit à puissance constante. La puissance délivrée peut donc être visualisée comme un signal "fenêtre" d'une valeur de Q_w qui commence en $t = 0$, est maintenu constant pendant toute la durée de la

combustion et tombe à zéro au bout de deux heures. La valeur de la puissance moyenne de combustion se calcule de la façon suivante :

$$Q_w = \frac{\text{PCI} \cdot m_b}{t_c} = 33,55 \text{ kW}$$

- PCI est le pouvoir calorifique du bois [$\frac{MJ}{kg}$],
- m_b est la masse de bois engagée dans la combustion [kg],
- t_c est de le temps de combustion [s].

2.3.3 Aéraulique du problème négligée

Comme expliqué précédemment, la configuration de l'accumulateur considérée est très simplifiée et ne ressemble pas à ce que l'on retrouve dans les poêles de masse. En effet, le dimensionnement des carnaux d'un poêle de masse repose sur une étude thermo-aéraulique complexe. Cette étude permet de connaître l'évolution de la température des fumées dans les carnaux et de modéliser ainsi le transfert de chaleur des fumées vers le matériau accumulateur. Dans ce chapitre, notre objectif n'est pas de dimensionner un poêle de masse, mais de classer les matériaux pour l'accumulateur. Par conséquent, nous allons simplifier le transfert de chaleur entre les fumées et l'accumulateur. Nous considérons que la puissance délivrée par la combustion du bois Q_w est captée par l'accumulateur avec un rendement de 90 % et uniformément répartie dans celui-ci. En d'autres termes, au lieu de modéliser un transfert de chaleur dépendant de la différence de température entre les fumées et l'accumulateur, nous considérerons un flux de chaleur q_w , constant et égal à :

$$q_w = 0,9 \frac{Q_w}{A_i} = 0,9 \frac{33550}{4 \cdot 2} \approx 3774 \frac{W}{m^2}$$

où A_i est la surface totale d'échange entre l'accumulateur et les fumées.

2.3.4 Champ de température unidimensionnel

Sur la figure [2.2](#), on peut observer que l'accumulateur est constitué de quatre parois identiques. De plus, elles sont soumises aux mêmes conditions aux frontières. En effet, le flux de chaleur à l'interface entre les fumées et l'accumulateur est constant, et chacune des parois extérieures de l'accumulateur évolue dans le même environnement. Nous pouvons donc nous focaliser sur une seule paroi, et reporter les résultats obtenus sur les trois autres. Voici donc une représentation de la coupe horizontale du domaine étudié :

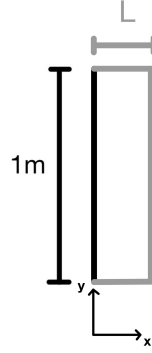


FIGURE 2.3 – Coupe horizontale du domaine étudié

Nous simplifions notre problème en considérant que le champ de température dans cette paroi de l'accumulateur est unidimensionnel et ne dépend que de x . Ainsi, grâce à cette hypothèse d'unidimensionnalité, il est possible de simplifier l'équation aux dérivées partielles de la chaleur [2.8](#) de la façon suivante :

$$\frac{T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (2.9)$$

Cette simplification repose sur plusieurs hypothèses que nous allons détailler.

Invariance propriétés thermiques

Nous supposons que les propriétés thermiques du matériau ne varient pas dans le domaine considéré. Ainsi on a :

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z) &= \rho \\ c_p(x, y, z) &= c_p \\ k(x, y, z) &= k \end{aligned} \quad (2.10)$$

Flux de chaleur unidirectionnel

Nous faisons également l'hypothèse que le flux de chaleur a uniquement une composante selon l'axe x , et n'en présente aucune selon les axes y et z .

Uniformité de l'air ambiant

Les conditions de l'air ambiant à la paroi extérieure de l'accumulateur sont constantes et ne varient ni selon l'axe y ni selon l'axe z .

2.3.5 Température constante de l'environnement autour du poêle

Pour des raisons de simplification de la résolution du problème aux conditions limites, nous faisons l'hypothèse que les conditions de pression et de température de l'environnement dans lequel le poêle évolue, sont constante au cours du temps. La hausse de température ambiante due à l'apport de chaleur de l'accumulateur à l'environnement extérieur est négligée. La température ambiante sera constamment de 15 [°C] et la pression de 1 [atm].

2.3.6 Remplacement du rayonnement par une convection surestimée

Nous avons expliqué en [2.2.1](#) que le transfert de chaleur à l'interface entre l'accumulateur et l'air ambiant se fait par convection naturelle et par rayonnement. Cependant, comme indiqué dans l'équation [2.2](#), le flux de chaleur émis par rayonnement dépend de la température T , élevée à la puissance 4. Afin de simplifier la résolution de l'EDP, nous allons remplacer le flux radiatif émis par l'accumulateur par un flux convectif surévalué, de manière à ce qu'il tienne compte du flux radiatif. Pour rappel, l'équation qui exprime un transfert de chaleur convectif est la suivante :

$$q_{conv} = \bar{h}_{conv}(T - T_0)$$

Une première étape est de déterminer $\bar{h}_{conv}$, le coefficient moyen de transfert de chaleur par convection.

Calcul du coefficient de transfert thermique par convection naturelle

Pour calculer ce coefficient, plusieurs relations sont à utiliser. Tout d'abord la définition du nombre de Nusselt :

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}_{conv}L}{k} \quad (2.11)$$

La corrélation de Churchill et Chu qui caractérise le transfert de chaleur par convection naturelle autour d'une plaque verticale isotherme :

$$\overline{Nu}_L = \left(0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra_L^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2 \quad (2.12)$$

Avec le nombre de Rayleigh :

$$Ra = Pr \ Gr \quad (2.13)$$

Le nombre de Grashof :

$$Gr = \frac{\beta_0(T_w - T_0)gL^3}{\nu_0^2} \quad (2.14)$$

Le flux convectif donné par :

$$0,45 \boxed{3} q = \bar{h}_{conv}(T_w - T_0) \quad (2.15)$$

où

- $\overline{Nu_L}$ est le nombre de Nusselt moyen du transfert thermique,
- Ra_L est le nombre de Rayleigh du transfert thermique,
- Gr est le nombre de Grashof du transfert thermique,
- L est la longueur caractéristique de la plaque verticale et est de 2 [m],
- k est la conductivité thermique de l'air ambiant [$\frac{W}{mK}$],
- ν_0 est la viscosité cinématique de l'air ambiant [$\frac{m^2}{s}$],
- T_0 est la température de l'air ambiant [K],
- β_0 est le coefficient de dilation thermique volumétrique de l'air ambiant [$\frac{1}{K}$],
- Pr est le nombre de Prandtl de l'air ambiant,
- T_w est la température de la paroi de l'accumulateur à l'interface avec l'air ambiant [K],
- q est le flux thermique sortant de l'accumulateur à l'interface avec l'environnement [$\frac{W}{m^2}$],
- g est l'accélération de pesanteur [$\frac{m}{s^2}$].

Comme expliqué dans l'hypothèse qui considère les conditions de température et de pression constantes, l'air aura certainement une pression de 1 [atm] et une température de 15[°C]. Dans ces conditions, on a :

$$k = 0,02476 \frac{W}{Km} ; \nu_0 = 1,47.10^{-5} \frac{m^2}{s} ; \beta_0 = 3,47.10^{-3} \frac{1}{K}$$

$$Pr = 0,7323$$

3. Le facteur 0,45 vient du fait que, comme expliqué en [2.2.1](#), le flux convectif représente 45 % du flux total.

Compte tenu des contraintes [2.6](#) et [2.7](#) imposées sur le flux de chaleur sortant de l'accumulateur, nous utilisons pour q la valeur médiane l'intervalle défini par ces deux conditions. Ainsi on considère :

$$q = 437,5 \frac{W}{m^2}$$

En résolvant le système des 5 équations, on obtient les résultats suivant :

$$\overline{Nu_L} = 376,146; Gr = 4,816.10^{11}; Ra = 3,527.10^{11}; \bar{h}_{conv} = 4,657 \frac{W}{Km^2}$$

Prise en compte de l'effet radiatif

Pour prendre en compte le transfert de chaleur par rayonnement qui représente les 55 % restant, nous allons surestimer le coefficient $\bar{h}_{conv}$ afin de trouver un nouveau $\bar{h}$ qui devient :

$$\bar{h} = \frac{\bar{h}_{conv}}{0,45} = 10,348 \frac{W}{Km^2}$$

Ainsi, le flux de chaleur total sortant de l'accumulateur à l'interface avec l'environnement dans lequel il évolue est de :

$$q = \bar{h}(T - T_0) \tag{2.16}$$

2.4 Résolution du problèmes aux conditions limites

L'équation unidimensionnelle de la chaleur (selon x) est donnée par :

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \tag{2.17}$$

4. Dans cette équation, T correspond à la température de l'accumulateur à l'interface avec l'environnement extérieur.

Afin de représenter le champ de température dans l'accumulateur, nous allons considérer deux sous-problème à résoudre : la phase de stockage et la phase de restitution. La phase de stockage débute au temps 0 et s'achève après 2 heures tandis que la phase de restitution commence après 2 heures et dure 10 heures. Elles sont toutes deux régies par l'équation [2.17](#). Cependant, elles comportent des conditions limites différentes.

2.4.1 Conditions limites de la phase de stockage

Conditions aux frontières

1. À $x = 0$ (interface interne avec les fumées) :

$$-k \frac{\partial T^{stock}}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_w \quad (2.18)$$

2. À $x = L$ (interface externe avec l'air ambiant) :

$$-k \frac{\partial T^{stock}(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=L} = h[T^{stock}(x = L, t) - T_0] \quad (2.19)$$

Condition initiale

Initialement l'accumulateur est à l'équilibre avec son environnement et sa température initiale est uniforme et égale à T_0 :

$$T^{stock}(x, 0) = T_0 \quad (2.20)$$

2.4.2 Résolution de la phase de stockage

On peut écrire la solution du champ de température comme la superposition d'une solution stationnaire et d'une solution transitoire de la façon suivante :

$$T^{stock}(x, t) = T^{stock,s}(x) + T^{stock,t}(x, t) \quad (2.21)$$

Pour des raisons de simplification des calculs nous résolvons le champ de température $\hat{T}^{stock}(x, t) = T^{stock}(x, t) - T_0$. Une fois $\hat{T}$ calculés il suffit de lui additionner T_0 afin d'obtenir le champ de température réel. En respectant le principe de superposition, les conditions limites pour la solution stationnaire $\hat{T}^{stock,s}(x)$ sont :

$$-k \frac{d\hat{T}^{stock,s}}{dx} \Big|_{x=0} = q_w \quad (2.22)$$

$$-k \frac{d\hat{T}^{stock,s}}{dx} \Big|_{x=L} = h \left(\hat{T}^{stock,s}(x=L) \right) \quad (2.23)$$

Les conditions limites pour la solution transitoire $T^{stock,t}(x, t)$ sont :

$$-k \frac{d\hat{T}^{stock,t}}{dx} \Big|_{x=0} = 0 \quad (2.24)$$

$$-k \frac{d\hat{T}^{stock,t}}{dx} \Big|_{x=L} = h \left(\hat{T}^{stock,t}(x=L, t) \right) \quad (2.25)$$

Composante stationnaire

Pour la composante stationnaire, l'équation [2.17](#) devient la suivante :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \hat{T}^{stock,s}(x, t)}{\partial x^2} &= 0 \\ \Leftrightarrow \hat{T}^{stock,s}(x) &= Ax + B \end{aligned}$$

Grâce aux conditions limites [2.22](#) et [2.23](#), on peut identifier les constantes A et B :

$$\left. \begin{aligned} A &= -\frac{q_w}{k} \\ B &= \frac{q_w}{h} \left(1 + \frac{hL}{k} \right) \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \hat{T}^{stock,s}(x) = -\frac{q_w}{k} x + \frac{q_w}{h} \left(1 + \frac{hL}{k} \right)$$

Composante transitoire

Pour calculer la composante transitoire, nous allons utiliser la méthode de séparation de variable. Ainsi, nous définissons une fonction $f(x)$ et $g(t)$ qui dépendent respectivement uniquement de la position x et du temps t . La composante transitoire du champ de température est le produit de ces deux fonction :

$$\hat{T}^{stock,t} = f(x)g(t) \quad (2.26)$$

Si on injecte cette expression dans l'équation [2.17](#), nous obtenons les relations suivante :

$$\frac{g'(t)}{\alpha g(t)} = \frac{f''(x)}{f(x)} = \pm \lambda^2 \quad (2.27)$$

Pour le cas $+\lambda^2$, nous obtenons les équations différentielles suivantes :

$$\frac{g'(t)}{\alpha g(t)} = \lambda^2 \Leftrightarrow g'(t) = \alpha \lambda^2 g(t) \quad (2.28)$$

5. λ est une constante

et

$$\frac{f''(x)}{f(x)} = \lambda^2 \Leftrightarrow f''(x) = \lambda^2 f(x) \quad (2.29)$$

En résolvant ces équations, nous trouvons :

$$g(t) = Ee^{\alpha\lambda^2 t}$$

et

$$f(x) = C \cosh(\lambda x) + D \sinh(\lambda x)$$

Si nous y appliquons les conditions limites [2.24](#) et [2.25](#) :

$$-k\lambda C \cosh(0) = 0 \Leftrightarrow C = 0 \quad (2.30)$$

$$-k\lambda B \sinh(\lambda L) = hB \cosh(\lambda L) \Leftrightarrow B = 0 \quad (2.31)$$

Cela montre que pour le cas $+\lambda^2$, la solution transitoire est triviale (nulle) sous ces conditions limites, ce qui indique que ce mode ne contribue pas à la solution transitoire.

Pour le cas $-\lambda^2$, nous obtenons les équations différentielles suivantes :

$$\frac{g'(t)}{\alpha g(t)} = -\lambda^2 \Leftrightarrow g'(t) = -\alpha\lambda^2 g(t) \quad (2.32)$$

et

$$\frac{f''(x)}{f(x)} = -\lambda^2 \Leftrightarrow f''(x) = -\lambda^2 f(x) \quad (2.33)$$

En résolvant ces équations, nous trouvons :

$$g(t) = Ee^{-\alpha\lambda^2 t}$$

et

$$f(x) = C \cos(\lambda x) + D \sin(\lambda x)$$

Si nous y appliquons les conditions limites [2.24](#) et [2.25](#) :

$$C\lambda = 0 \Leftrightarrow C = 0 \quad (2.34)$$

$$k\lambda \sin(\lambda L) = h \cos(\lambda L) \Leftrightarrow \tan(\lambda L) = \frac{h}{k\lambda} \quad (2.35)$$

L'équation [2.35](#) a une séquence infinie de solutions positives :

$$0 < \lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \dots$$

Les solutions de l'équation sont observables à la figure [2.4](#) aux intersections entre

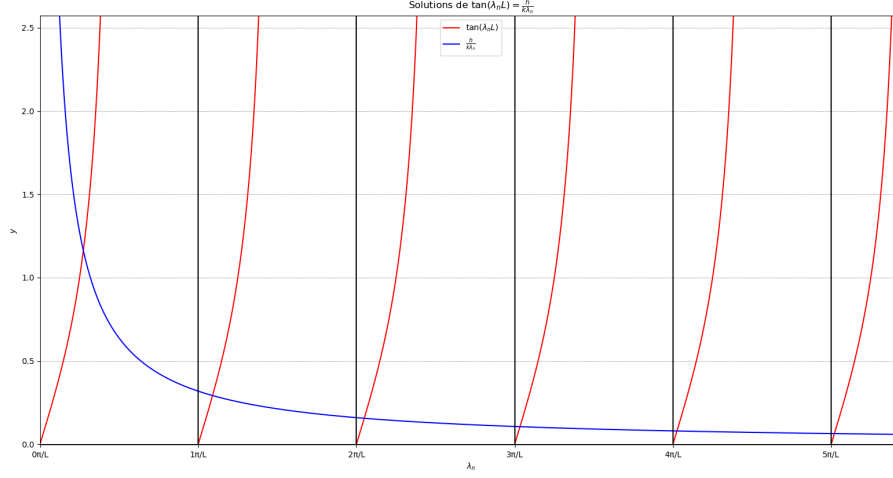


FIGURE 2.4 – Représentation graphique des solutions λ_n

les courbes de la tangente (rouges) et la fonction bleue. Elles dépendent des valeurs de h , k et L , qui ont été choisies arbitrairement sur cette représentation. Ainsi les modes normaux de la composante transitoire de notre problème aux conditions limites sont donnés par :

$$\hat{T}_n^{stock,t}(x, t) = f_n(x)g_n(t) = F_n e^{\lambda_n^2 t} \cos(\lambda_n x) \quad (2.36)$$

Pour obtenir la composante transitoire de la solution, il est nécessaire de sommer la composante trouvée ci-dessus sur tous ses modes propres :

$$\hat{T}^{stock,t} = \sum_{n=0}^{\infty} F_n e^{\lambda_n^2 t} \cos(\lambda_n x) \quad (2.37)$$

Afin d'identifier les constantes F_n nous allons utiliser la condition initiale de notre problème :

$$\begin{aligned} \hat{T}^{stock}(x, t=0) &= 0 \\ \hat{T}^{stock,s}(x) + \hat{T}^{stock,t}(x, t=0) &= 0 \\ \sum_{n=0}^{\infty} F_n \cos(\lambda_n x) &= \frac{q_w}{k} x - \frac{q_w}{h} \left(1 + \frac{hL}{k}\right) \end{aligned}$$

En imposant notre condition initiale, cela nous donne une expression de la forme :

$$\sum_{n=0}^{\infty} F_n \cos(\lambda_n x) = h(x) \quad (2.38)$$

Il s'agit du développement en séries de Fourier généralisées de $h(x) = \frac{q_w}{k}x - \frac{q_w}{h} \left(1 + \frac{hL}{k}\right)$. Pour calculer les coefficients de Fourier généralisés F_n il faut partir du principe suivant [6] :

Les fonctions

$$X_1(x) = \cos(\lambda_1 x), \quad X_2(x) = \cos(\lambda_2 x), \quad X_3(x) = \cos(\lambda_3 x), \dots$$

forment un ensemble orthogonal et complet⁶ sur $[0, L]$.de

Etant donné l'orthogonalité de nos fonctions $X_n(x)$ nous pouvons dire que :

$$\begin{aligned} \langle h(x), X_n(x) \rangle &= \sum_{m=1}^{\infty} F_m \langle \cos(\mu_m x), \cos(\mu_n x) \rangle \\ &= F_n \langle \cos(\mu_n x), \cos(\mu_n x) \rangle \\ &= F_n \langle X_n(x), X_n(x) \rangle \end{aligned}$$

On peut ainsi isolé les coefficients de Fourier généralisés :

$$F_n = \frac{\langle h(x), X_n(x) \rangle}{\langle X_n(x), X_n(x) \rangle} = \frac{\int_0^L h(x) \cos(\lambda_n x) dx}{\int_0^L \cos^2(\lambda_n x) dx} \quad (2.39)$$

Solution générale

En additionnant la composante stationnaire et transitoire, nous obtenons la solution générale du champ de température en fonction de la position x dans l'accumulateur et du temps :

$$T^{stock}(x, t) = -\frac{q_w}{k}x + \frac{q_w}{h} \left(1 + \frac{hL}{k}\right) + T_0 + \sum_{n=0}^{\infty} F_n \cos(\lambda_n x) e^{-\lambda_n^2 t} + T_0 \quad (2.40)$$

6. Une fonction complète est une fonction qui peut être représentée par des séries de Fourier généralisées.

2.4.3 Conditions limites de la phase de restitution

Conditions frontières

1. À $x = 0$ (paroi isolée) :

$$\left. \frac{\partial T^{res}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (2.41)$$

2. À $x = L$ (interface externe avec l'air ambiant) :

$$-k \left. \frac{\partial T^{res}}{\partial x} \right|_{x=L} = h[T^{res}(x = L, t) - T_0] \quad (2.42)$$

Condition initiale

La température initiale de l'accumulateur est uniforme et égale à T_0 :

$$T^{res}(x, 0) = T^{stock}(x, t = 7200) \quad (2.43)$$

2.4.4 Résolution de la phase de restitution

Comme pour la phase de stockage, nous pouvons séparer la solution du champ de température en la superposition d'un composante stationnaire et transitoire :

$$T^{res}(x, t) = T^{res,s}(x) + T^{res,t}(x, t) \quad (2.44)$$

A nouveau, pour des raisons de simplification des calculs nous résolvons le champ de température $\hat{T}^{res}(x, t) = T^{res}(x, t) - T_0$. Afin de respecter le principe de superposition des solutions, nous établissons les conditions aux frontières de la façon suivante :

$$\left. \frac{\partial \hat{T}^{res,s}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (2.45)$$

$$-k \left. \frac{\partial \hat{T}^{res,s}}{\partial x} \right|_{x=L} = h[\hat{T}^{res}(x = L, t)] \quad (2.46)$$

$$\left. \frac{\partial \hat{T}^{res,t}}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (2.47)$$

$$-k \left. \frac{\partial \hat{T}^{res,t}}{\partial x} \right|_{x=L} = h[\hat{T}^{res}(x = L, t)] \quad (2.48)$$

Composante stationnaire

Pour la composante stationnaire, comme pour la phase de stockage, nous avons :

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \hat{T}^{res,s}(x,t)}{\partial x^2} &= 0 \\ \Leftrightarrow \hat{T}^{res,s}(x) &= Ax + B\end{aligned}$$

En s'appuyant sur les conditions limites [2.45](#) et [2.46](#) on observe que la solution de la composante stationnaire est triviale (nulle) :

$$\left. \begin{aligned} A &= 0 \\ B &= 0 \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \hat{T}^{res,s}(x) = 0$$

Le champ de température de la phase de restitution n'a donc pas de composante stationnaire.

Composante transitoire

De la même façon que pour la phase de stockage nous allons procéder par séparation de variable :

$$\hat{T}^{res,t}(x,t) = f(x)g(t) \quad (2.49)$$

Nous sommes confrontés aux mêmes équations différentielles que pour la composante transitoire de la phase de stockage :

$$\frac{g'(t)}{\alpha g(t)} = \frac{f''(x)}{f(x)} = \pm \lambda^2 \quad (2.50)$$

Ainsi pour la composante transitoire de la phase de restitution, nous sommes confrontés au même problème aux conditions frontières que pour la composante transitoire de la phase de stockage. En effet les équations différentielles sont identiques et les conditions frontières ([2.24](#), [2.25](#) pour le stockage et [2.47](#) et [2.48](#) pour la restitution) le sont également. La forme de la solution est donc la même qu'en [2.37](#). Cependant la condition initiale n'est pas la même et les coefficients de Fourier généralisés seront différents :

$$\hat{T}^{res,t}(x,t) = \sum_{n=0}^{\infty} G_n \cos(\lambda_n x) e^{-\lambda_n^2 t} \quad (2.51)$$

Nous déterminerons les coefficients G_n de la même façon que pour la phase de stockage, avec l'équation [2.39](#). Cependant, dans ce cas $h(x) = \hat{T}^{stock}(x, t = 7200)$.

Solution générale

La solution générale ne possédant pas de composante stationnaire, elle se résume à la composante transitoire calculée ci-avant.

$$T^{res}(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} G_n \cos(\lambda_n x) e^{-\lambda_n^2 t} + T_0 \quad (2.52)$$

2.4.5 Récapitulatif

Au final sur le cycle de 12 heures le champ de température sera le suivant :
Pour $0 < t < 2$ [h] :

$$T^{stock}(x, t_{stock}) = -\frac{q_w}{k}x + \frac{q_w}{h} \left(1 + \frac{hL}{k}\right) + T_0 + \sum_{n=0}^{\infty} F_n \cos(\lambda_n x) e^{-\lambda_n^2 t_{stock}} + T_0$$

avec $0 < t_{stock} < 7200$ s

Pour 2 [h] $< t < 12$ [h] :

$$T^{res}(x, t_{res}) = \sum_{n=0}^{\infty} G_n \cos(\lambda_n x) e^{-\lambda_n^2 t_{res}} + T_0$$

avec $0 < t_{res} < 36000$ s

Le calcul des coefficients des séries de Fourier F_n et G_n , ainsi que la recherche des λ_n , seront effectués numériquement. Le code Python fourni en annexe [A](#) permet de déterminer d'évaluer la solution analytique pour obtenir des résultats numériques.

2.5 Résultats attendus

Revenons aux contraintes discutées en [2.2.2](#) à propos du flux de chaleur sortant de l'accumulateur vers l'environnement extérieur. Il faut les traduire en une contrainte sur les champs de température résolus dans cette section. Grâce à notre hypothèse de simplification [2.3.6](#) nous pouvons relier le flux sortant de l'accumulateur à sa température de surface de la façon suivante :

$$T(x = L, t) = \frac{q}{h} + T_0$$

1. Pour la contrainte [2.7](#) qui porte sur le flux minimal à atteindre à la fin de la combustion, il peut se traduire par une borne inférieure pour le champ de température en fin de stockage :

$$T^{stock}(x = L, t = 7200) > 348[K] \quad (2.53)$$

2. Pour la contrainte [2.6](#) qui porte sur le flux minimal à obtenir à la fin de cycle du poêle, il peut se traduire par une borne inférieure pour le champ de température en fin de restitution :

$$T^{res}(x = L, t = 36000) > 312[K] \quad (2.54)$$

2.6 Discussion des résultats

Afin de classer les matériaux pour l'accumulateur du poêle de masse, nous appliquerons notre solution analytique pour simuler l'évolution du champ de température. Chaque matériau sera testé avec différentes épaisseurs jusqu'à ce que les contraintes [2.53](#) et [2.54](#) soient satisfaites. Nous nous assurerons également que la température au sein de l'accumulateur ne dépasse jamais la température maximale admissible du matériau, en tout point. C'est la plus petite épaisseur qui sera retenue pour chaque matériaux. Ce sont ceux de la base de données Niveau 1 du logiciel Granta EduPack qui seront testés.

2.6.1 Matériaux conformes aux exigences

Dans le tableau [2.1](#) figurent le noms des matériaux conformes aux exigences, ainsi que leurs propriétés qui nous intéressent.

Matériau	$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$k \left[\frac{W}{m.K} \right]$	$c_p \left[\frac{J}{K.kg} \right]$	T° max admissible [K]
Brique argile cuit	2025	0,6	800	1100
Béton	2400	2,125	942,5	774
Pierre	2300	5,7	880	600
Verre de silice	2195	1,35	725	1170
Acier carbone	7800	50,5	472,5	548
Acier inox	7740	19,45	480	913
Fonte	7085	52,85	484	623
Titane	4500	9,1	540	573
Alliage de nickel	8325	14,4	444,5	708

TABLE 2.1 – Propriétés des matériaux conformes

2.6.2 Résultats pour les différents matériaux

Pour chaque matériau conforme, nous présentons les courbes de la température de surface de l'accumulateur à la fin de la combustion et à la fin de la restitution en fonction de l'épaisseur de l'accumulateur. La valeur minimal de celle-ci pour satisfaire les contraintes sera également indiquée, ainsi que la température maximale atteinte dans le matériau tout au long du cycle.

Brique en argile cuite

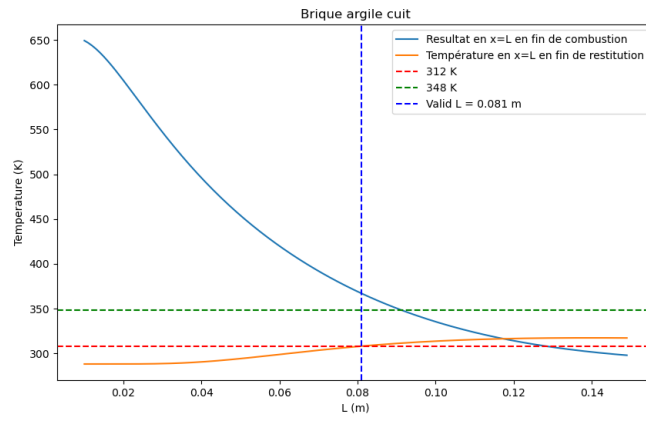


FIGURE 2.5 – Températures de surface pour la brique en argile cuite

Avec l'épaisseur $L = 8,1$ [cm], la température maximale rencontrée dans l'accumulateur au cours du cycle est de 658 [K].

Béton

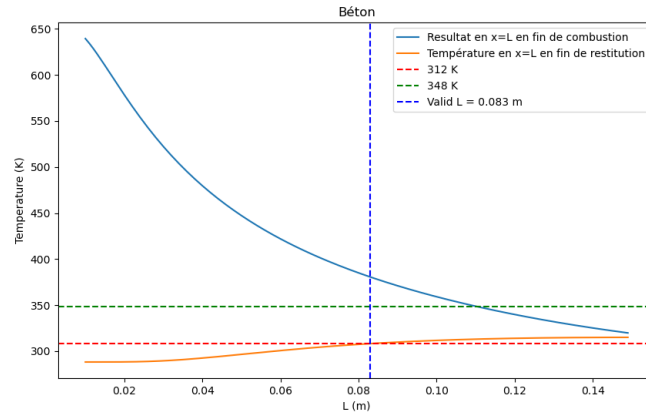


FIGURE 2.6 – Températures de surface pour le béton

Avec l'épaisseur $L = 8,3$ [cm], la température maximale rencontrée dans l'accumulateur au cours du cycle est de 471 [K].

Pierre

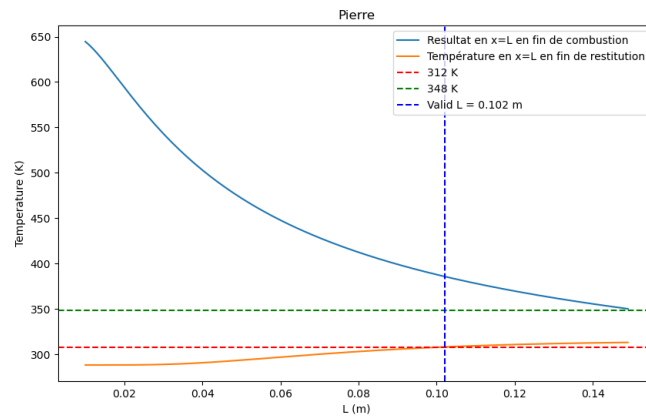


FIGURE 2.7 – Températures de surface pour la pierre

Avec l'épaisseur $L = 10,2$ [cm], la température maximale rencontrée dans l'accumulateur au cours du cycle est de 428 [K].

Verre de silice

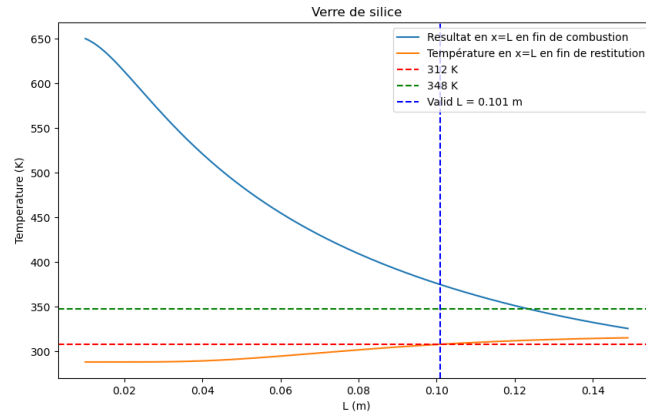


FIGURE 2.8 – Résultat verre de silice

Avec l'épaisseur $L = 10,1$ [cm], la température maximale rencontrée dans l'accumulateur au cours du cycle est de 543 [K].

Acier au carbone

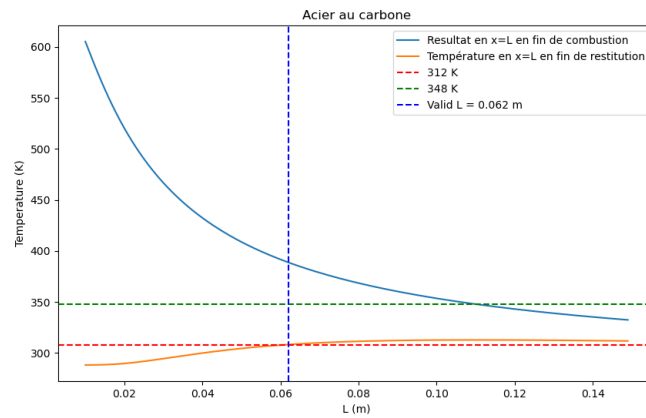


FIGURE 2.9 – Résultat acier au carbone

Avec l'épaisseur $L = 6,2$ [cm], la température maximale rencontrée dans l'accumulateur au cours du cycle est de 392 [K].

Acier inox

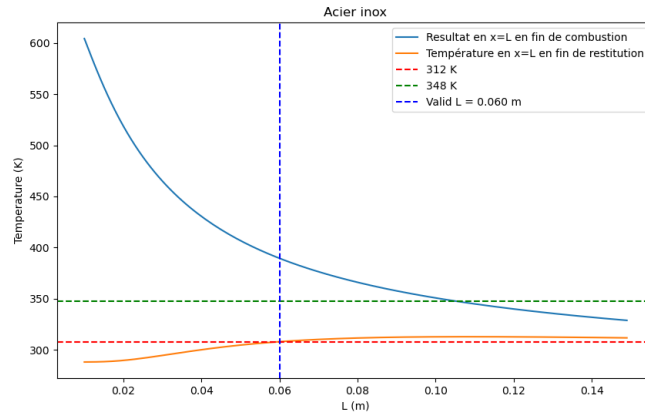


FIGURE 2.10 – Résultat acier inox

Avec l'épaisseur $L = 6,0$ [cm], la température maximale rencontrée dans l'accumulateur au cours du cycle est de 397 [K].

Fonte

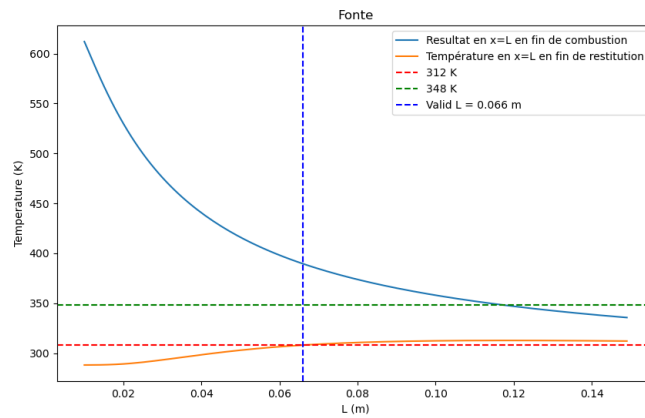


FIGURE 2.11 – Résultat fonte

Avec l'épaisseur $L = 6,6$ [cm], la température maximale rencontrée dans l'accumulateur au cours du cycle est de 393 [K].

Titane

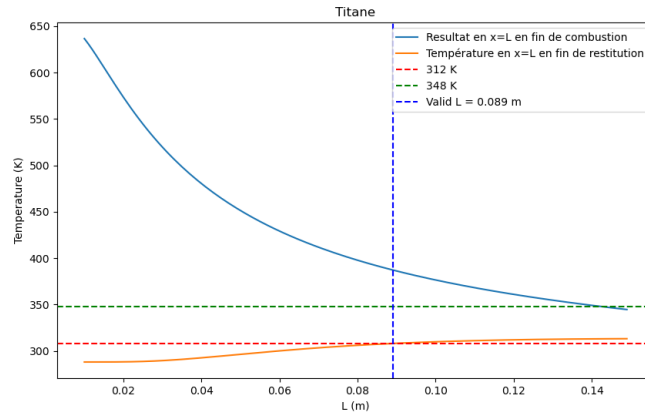


FIGURE 2.12 – Résultat titane

Avec l'épaisseur $L = 8,9$ [cm], la température maximale rencontrée dans l'accumulateur au cours du cycle est de 411 [K].

Alliage de nickel

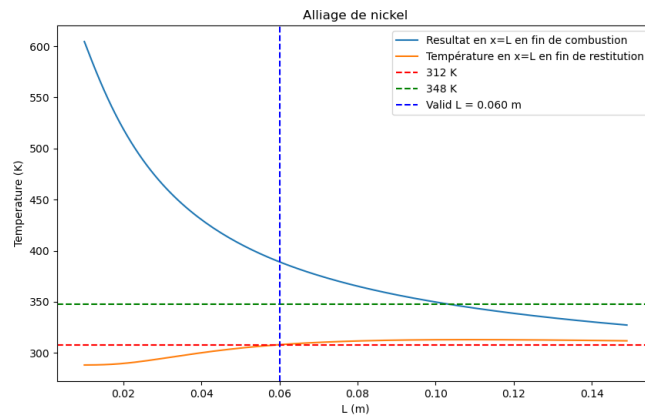


FIGURE 2.13 – Résultat alliage de nickel

Avec l'épaisseur $L = 6,0$ [cm], la température maximale rencontrée dans l'accumulateur au cours du cycle est de 399 [K].

2.6.3 Valeurs des critères pour les différents matériaux

Maintenant que nous avons identifié les matériaux et les quantités nécessaires pour respecter les contraintes de l'accumulateur, nous pouvons évaluer leur coût économique ainsi que leurs émissions de gaz à effet de serre. Les valeurs massiques des émissions de gaz à effet de serre et prix pour chaque matériau ont été obtenues à partir du logiciel Granta EduPack.

Position	Matériau	Prix [€]
1	Béton	80
2	Pierre	901
3	Brique	1496
4	Fonte	2357
5	Acier carbone	4681
6	Verre silice	14741
7	Acier inox	16235
8	Titane	85226
9	Alliage nickel	123277

FIGURE 2.14 – Classement prix total des matériaux

Position	Matériau	Coût CO ₂ [tCO ₂ .eq]
1	Pierre	0,113
2	Béton	0,164
3	Brique	0,315
4	Verre de silice	3,805
5	Fonte	8,885
6	Acier carbone	9,208
7	Acier inox	20,228
8	Alliage nickel	50,350
9	Titane	114,223

FIGURE 2.15 – Classement du coût CO₂ total des matériaux

2.6.4 Compromis entre les deux critères de sélection

Comme le montrent les tableaux 2.14 et 2.15, un matériau intéressant d'un point de vue du coût CO₂ ne l'est pas forcément d'un point de vue économique. Pour cela, nous allons établir une fonction de pénalité Z qui est la suivante :

$$Z = 0,5 \times \epsilon_{\text{norm-z}} + 0,5 \times \text{CO2}_{\text{norm-z}} \quad (2.55)$$

où :

- $\epsilon_{\text{norm-z}}$ est le prix normalisé par Z-score
- $\text{CO2}_{\text{norm-z}}$ est le coût CO₂ normalisé par Z-score

La normalisation par Z-score, utilisée pour obtenir $\epsilon_{\text{norm-z}}$ et $\text{CO2}_{\text{norm-z}}$, est calculée selon la formule suivante :

$$X_{\text{norm-z}} = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (2.56)$$

où :

- X est la valeur brute.
- μ est la moyenne des valeurs de l'ensemble des matériaux pour le critère considéré.

— σ est l'écart-type des valeurs de cet ensemble.

Ainsi, nous obtenons une fonction de pénalité Z qui exprime un compromis entre les deux critères de sélection. Plus la valeur de la fonction est faible, plus le matériau est intéressant.

Classement final

Sur la figure 2.16 on observe la carte multi-critères normalisée avec les différents matériaux placés sur celle-ci. La valeur de la fonction de pénalité Z pour chaque matériau est indiquée dans la légende. On constate que le haut du classement est

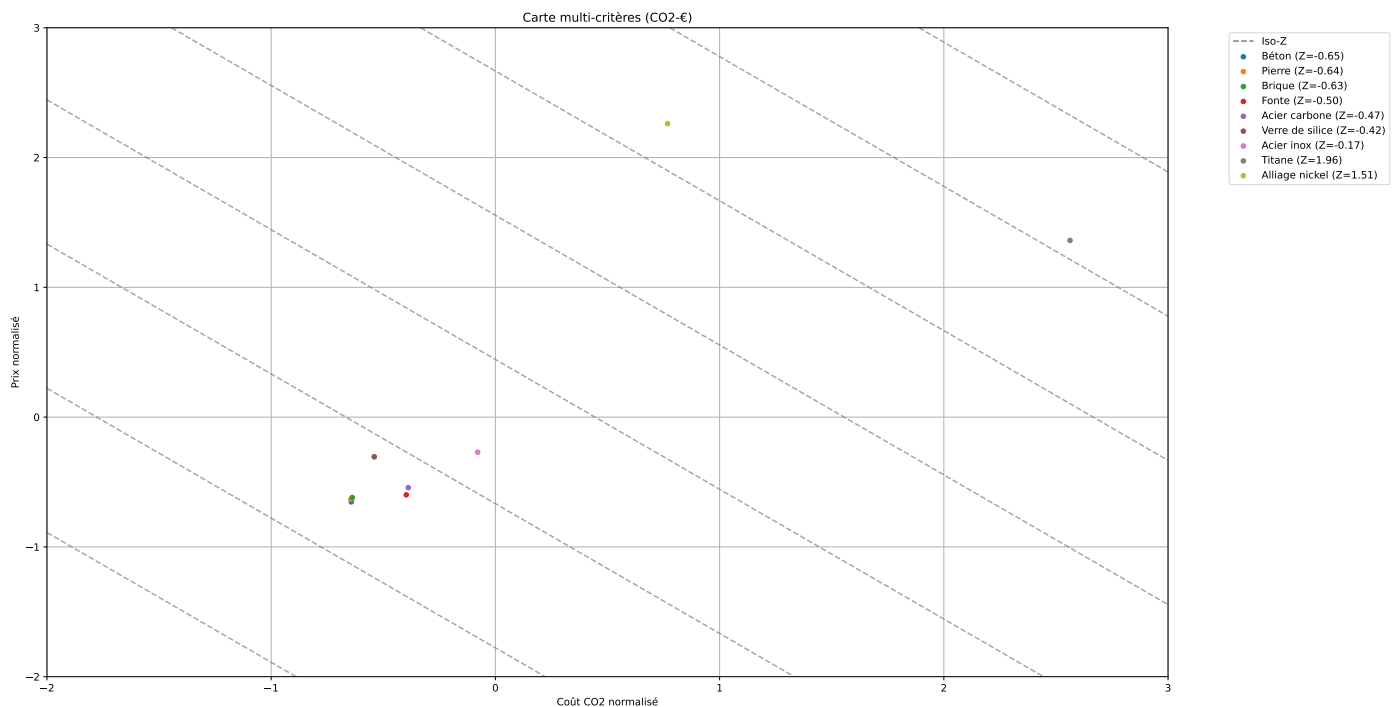


FIGURE 2.16 – Carte multi-critères normilée

très serré, avec le béton, la pierre et la brique en argile cuite dont les points sont très proches sur la carte. Il est également évident que l'alliage de nickel et le titane se trouvent en bas du classement. Le tableau 2.2 présente le classement final des matériaux, basé sur un compromis entre le coût CO_2 et le prix.

Rang	Matériau
1	Béton
2	Pierre
3	Brique en argile cuit
4	Fonte
5	Acier carbone
6	Verre de silice
7	Acier inox
8	Alliage nickel
9	Titane

TABLE 2.2 – Classement final des matériaux

Chapitre 3

Impact environnemental d'un poêle de masse

Ce chapitre traite de l'impact environnemental du chauffage domestique au moyen d'un poêle de masse. Nous analyserons comment ce mode de chauffage se compare à d'autres systèmes en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution atmosphérique. Nous aborderons également la question spécifique de la pollution atmosphérique causée par le chauffage au bois et explorerons des solutions pour l'atténuer.

Structure Chapitre 3

- (1) Analyse de cycle de vie du chauffage au poêle de masse
- (2) Analyse de sensibilité
- (3) Comparaison des systèmes de chauffage
- (4) Pollution atmosphérique du chauffage au bois

3.1 Méthodologie

3.1.1 Description du cas d'étude

Toutes les informations nécessaires à l'analyse du cas d'étude présenté ont été recueillies via à un formulaire rempli par plusieurs participants. Après avoir examiné les différentes réponses, nous avons sélectionné un cas spécifique pour l'étude. Il s'agit d'un poêle installé à Agimont, en Belgique. Le modèle concerné est le Medi Batchblock [31], un poêle de masse en kit fabriqué par la société Uzume. Il comporte un rendement de 80%. La capacité du foyer est de 12 kg. Le combustible

utilisé est du bois feuillu coupé en bûches. Il provient de forêts locales et est séché naturellement pendant deux ans au domicile, atteignant ainsi un taux d'humidité de 20 %.

3.1.2 Définition de l'ACV

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode utilisée pour mesurer les impacts environnementaux d'un produit, d'un processus ou d'un service. Cette approche prend en compte l'ensemble des étapes de son cycle de vie, incluant la production des matières premières, la fabrication, le transport et la gestion de fin de vie. Elle recense, pour chaque étape du cycle de vie, tous les flux entrants de matières premières et d'énergie et tous les flux sortants que sont les émissions de déchets (solides, liquides, gazeux). Ces flux sont ensuite traduits en indicateurs d'impact environnemental.

ACV normative

Cette méthode d'analyse est encadrée par les normes ISO 14040 et ISO 14044. Les règles méthodologiques à suivre sont rigoureuses et exigent une analyse très détaillée, ce qui requiert davantage de temps. Un rapport méthodologique complet de plusieurs dizaines de pages doit être rédigé pour détailler toutes les hypothèses et les données utilisées. Ce rapport est ensuite examiné par un expert indépendant, qui identifiera les éventuels écarts méthodologiques et formulera des réserves concernant l'interprétation des résultats. Ces procédures garantissent une robustesse méthodologique et une fiabilité accrues des résultats, permettant ainsi une communication transparente avec une rigueur scientifique au grand public.

ACV simplifiée

L'analyse de cycle de vie simplifiée suit les mêmes étapes qu'une ACV normative. Cependant, l'ACV simplifiée peut se contenter de données moins précises et de se focaliser sur certains indicateurs spécifiques au produit étudié. Une autre différence notable est que le rapport de ce type d'ACV n'a pas besoin d'être revu par un expert. Il n'est donc pas apte à être communiqué publiquement comme une analyse de cycle de vie.

C'est ce qui va être entrepris dans cette section, où nous nous concentrerons principalement sur l'impact du potentiel de réchauffement global et de la pollution atmosphérique.

3.1.3 Objectifs de l'étude

La présente étude vise à évaluer l'impact environnemental d'un poêle de masse utilisant des bûches de bois comme combustible, sur une période de 50 ans. Cette analyse permettra de comparer ce système de chauffage à d'autres moyens en termes d'impact environnemental.

3.1.4 Champs de l'étude

Définition du périmètre du système étudié

Lors de la réalisation d'une analyse de cycle de vie, il est essentiel de définir clairement le périmètre de l'étude pour déterminer les étapes du cycle de vie du produit à inclure dans l'évaluation. Il s'agira ici d'une ACV "du berceau à la tombe". Ce type d'analyse couvre l'ensemble des étapes du cycle de vie du poêle de masse, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie et l'élimination du produit en passant par son utilisation. Ce cycle de vie comprend deux cycles parallèles : celui du poêle en tant qu'infrastructure et le cycle du bois en tant que combustible. Nous les désignerons respectivement comme le cycle du poêle, et cycle du bois jusqu'à la chaleur. Sur la figure [3.1](#) se trouve une illustration graphique des processus à considérer pour le chauffage au moyen d'un poêle de masse :

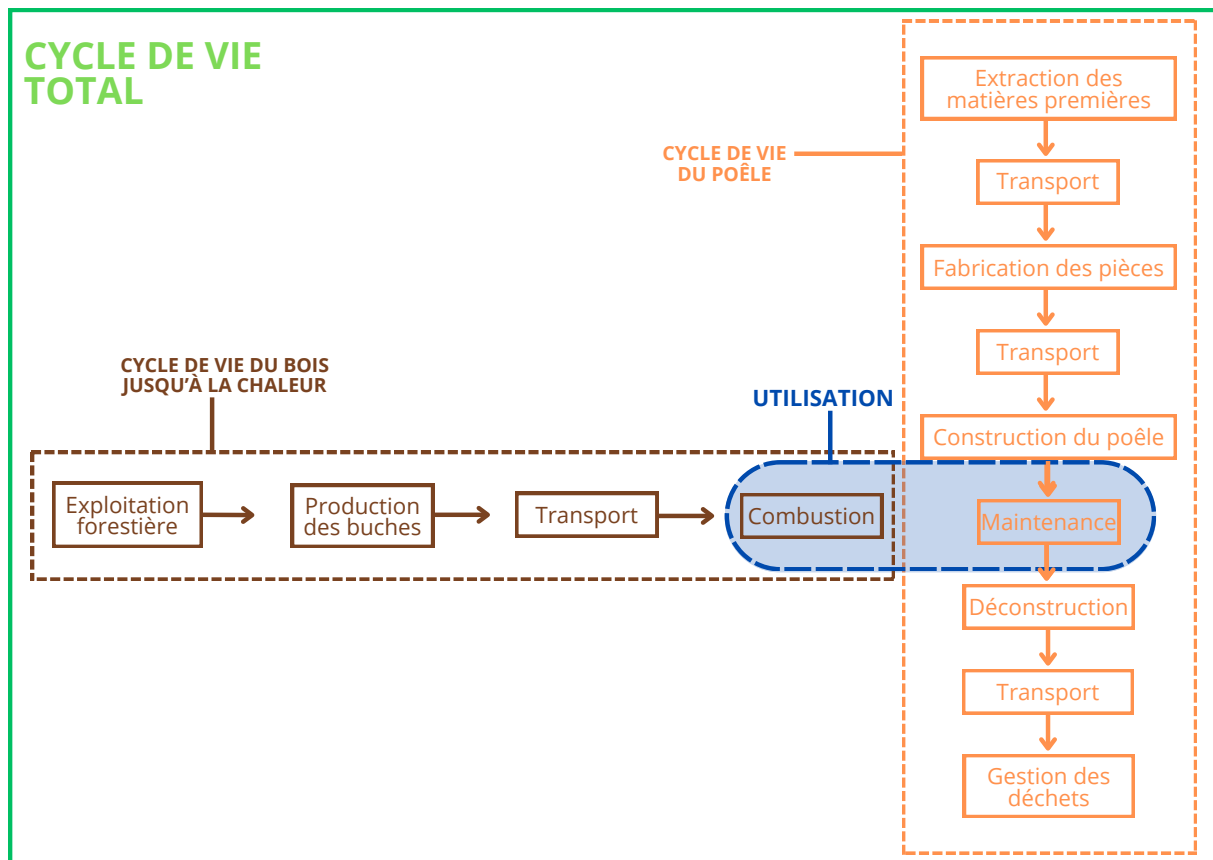


FIGURE 3.1 – Frontières de l'étude

Unité fonctionnelle

L'unité fonctionnelle est une mesure de référence dans une analyse de cycle de vie permettant de quantifier et de comparer les impacts environnementaux des produits ou services. Elle représente la fonction ou le service fourni par le produit étudié et est essentielle pour garantir la comparabilité et la cohérence des résultats. Dans le cadre de notre étude visant à comparer le poêle de masse avec différents systèmes de chauffage, il est essentiel d'utiliser une unité fonctionnelle permettant d'établir une comparaison basée sur une référence commune.

L'unité fonctionnelle choisie pour cette étude sera le kilowatt-heure (kWh) thermique fourni par le système de chauffage. Ce choix permettra de garantir des comparaisons cohérentes et transparentes des différents systèmes.

Impact environnementaux étudiés

Comme mentionné précédemment, notre analyse se concentrera sur deux indicateurs d'impact environnemental spécifiques : le potentiel global de réchauffement (PRG), et la pollution de l'air. Le premier indicateur mesure l'impact du réchauffement climatique dû au forçage radiatif des gaz à effet de serre émis dans l'atmosphère. Il est exprimé en kilogramme de dioxyde de carbone équivalent ($\text{kgCO}_2.\text{eq}$), ce qui traduit l'impact en une masse de CO_2 ayant un effet équivalent. Le second indicateur fournit une évaluation de l'impact sur la qualité de l'air extérieur exprimée en m^3 d'air. Ce nombre représente le volume d'air qui serait nécessaire pour diluer la pollution générée afin que celle-ci soit sans risque pour la santé. Les taux de pollution pour écarter tout risque sanitaire seront détaillés plus tard.

Données de caractérisation de l'impact environnemental

Pour évaluer le **cycle de vie du poêle**, on utilise la fiche de déclaration environnementale et sanitaires (FDES [24]) des matériaux qui le composent. Cette fiche quantifie les indicateurs d'impact environnemental sur le cycle de vie des matériaux. En cas d'absence de FDES pour un élément, nous utiliserons les données environnementales par défaut (DED [57]), fournies par le ministère de la transition écologique¹. Les impacts environnementaux du produit sont majorés pour couvrir l'incertitude du produit installé.

Pour le **cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur**, nous nous appuierons sur les données provenant de divers articles traitant de l'impact environnemental de l'utilisation du bois à des fins énergétiques, ainsi que plusieurs bases de données de facteurs d'émissions.

3.1.5 Hypothèses

Climat considéré

Les données climatiques utilisées dans cette analyse sont celles de Florennes, situé à une altitude de 257 m et à 20 km d'Agimont qui culmine 220 m. Ainsi, les climats de ces deux villages sont similaires. La base de donnée [34] indique que le nombre de jours à températures négatives pour les années 2021, 2022 et 2023 étaient de 15, 16 et 20, respectivement. Cela correspond à une moyenne de 17 jours par an. C'est la valeur que nous retiendrons pour notre analyse.

1. Le poêle étudié étant un poêle constitué de matériaux fabriqués en France, les données utilisées sont propres à la France et proviennent de la base de données Inies [25].

Essence de bois

Le bois utilisé est du feuillu. Etant donné que le bois de chauffage le plus couramment utilisé en Belgique est le hêtre [36], nous considérons cette essence dans notre étude. Les propriétés du hêtre figurent dans le tableau 3.1

Propriété	Valeur	Unité
Densité état vert	1000	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3_{\text{bois vert}}}$
Densité état sec*	680	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3_{\text{bois sec}}}$
PCI	3,728	$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}_{\text{bois sec}}}$
PCI	13,42	$\frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{bois sec}}}$

* 20% d'humidité.

TABLE 3.1 – Propriétés du hêtre

Pouvoir de réchauffement global des gaz à effet de serre

Le pouvoir de réchauffement d'un gaz peut être exprimé par rapport à plusieurs durées. En effet, le forçage radiatif d'un gaz tend à diminuer à mesure que son temps de résidence dans l'atmosphère augmente. Ainsi, comme le montre la figure 3.2, le PRG du CH_4 sur 25 ans sera plus élevé que celui sur 500 ans. Dans cette étude nous avons choisi d'utiliser le PRG sur 100 ans qui est celui qui est le plus couramment utilisé.

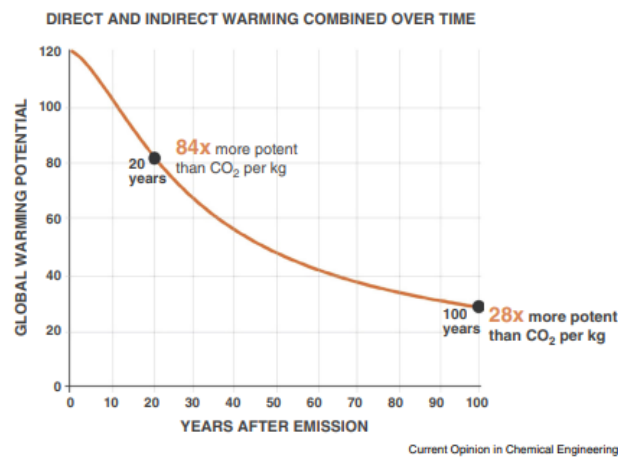


FIGURE 3.2 – Evolution du PRG du CH_4 en fonction du temps (source : [37])

Normes qualité de l'air

Pour pouvoir exprimer l'impact environnemental de la pollution atmosphérique en termes de volume d'air équivalent, il est nécessaire de connaître les concentrations maximales admissibles des différents polluants atmosphériques. Il existe des normes qui légifèrent la qualité de l'air dont les valeurs sont reprises dans le tableau 3.2

Polluant	Taux	Unité	Niveau de criticité
NO _x	30	$\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$	Niveau critique pour la protection de la végétation
PM*	20	$\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$	Valeur cible pour la protection de la santé humaine
COV	1	$\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$	Sans risque pour l'hygiène
CO	10	$\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$	Maximum journalier de la moyenne sur 8 heures

TABLE 3.2 – Normes qualité de l'air (sources : [38], [39])

* Dans notre étude, la distinction entre les PM2.5 et les PM10 n'est pas faite. Par conséquent, le taux le plus restrictif (celui des PM2.5) a été pris en compte.

Mix électrique

Le mix électrique considéré est de celui de la Belgique sur l'année 2023. il est constitué de 41,3 % de nucléaire, 25,2 % de gaz, 18,7 % d'éolien, 9,5 % de solaire, 2,6% de biogaz et 2,7 % d'autres moyens de production tel que l'hydroélectricité. Cette composition engendre un facteur d'émission de 0,179 kgCO₂.eq par kWh électrique produit ([28]). Concernant la pollution atmosphérique engendrée par ce mix électrique nous n'avons pas de données pour la Belgique mais nous en avons pour la France. Comme le montre la fiche [44] de la base Inies, la pollution engendrée la production d'un kWh électrique se traduit par un volume d'air équivalent égal à 43 m³.

3.2 Inventaire du cycle de vie

3.2.1 Cycle de vie du poêle

Pour évaluer l'impact du cycle de vie du poêle, nous analyserons chacun de ses composants individuellement. Comme expliqué précédemment, nous utiliserons

leur Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) qui fournit directement pour le produit les indicateurs d'impact sur l'environnement. Ces fiches prennent en compte l'ensemble du cycle de vie : de l'extraction des matériaux jusqu'à leur fin de vie. Cela correspond aux frontières de notre étude définies sur la figure 3.1. L'inventaire que nous réaliserons se limitera donc à lister les différents composants du poêle afin de rechercher leur fiche de déclaration environnementale.

Briques réfractaires

Les briques réfractaires et le mortier nécessaires à la construction du poêle proviennent de l'usine de briques PRSE située à Saint Vallier, en France. La distance de cette usine par rapport à celle d'Uzume est d'environ 230 km. La masse totale de briques réfractaires et de mortier confondus est de 1440 kg pour le Medi Batchblock. L'espérance de vie de l'ensemble maçonné est de 50 ans.

Métallerie et vitre du foyer

Tous les éléments métalliques, fabriqués en acier, sont produits en France directement dans l'usine Uzume située à Moulins. Cependant, l'origine exacte de l'acier utilisé n'est pas connue. Parmi ces composants métalliques, on trouve :

- Porte du foyer : 0,5 x 0,5 m,
- Trappe du cendrier : 0,22 x 0,36 m,
- Deux trappes de ramonage : 0,26 x 0,26 m,
- Deux tôles de revêtement : 0,858 x 0,818 m et 0,506 x 0,443 m.

La vitre de la porte du foyer mesure 0,345 x 0,345 m. La durée de vie des tôles est de 50 ans. Celle de la vitre et du reste de la métallerie est de 30 ans.

Fumisterie

Le conduit de fumisterie, dont la longueur est spécifique à la configuration de l'habitation, provient du grossiste Moulan situé à Chainieux en Belgique, à 150 km du lieu du chantier. Nous n'avons pas d'information sur l'origine exacte de ce composant. Le client n'a pas fait appel à UZUME pour la fumisterie. L'installation comprend 13 m de conduit double paroi de diamètre 180 mm. Une fois ces éléments rassemblés à l'usine Uzume² ils sont emballés sous forme de kit "prêt à construire" et expédié vers le chantier à Agimont situé à environ 500 km.

En ce qui concerne la fin de vie, aucune information n'est encore disponible sur la gestion de ce composant.

2. A l'exception de la fumisterie

3.2.2 Cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur

Activité forestière

Le premier processus de l'exploitation forestière se déroule en plusieurs étapes :

- Ebranchage : retrait des branches des arbres abattus, effectué au moyen d'une tronçonneuse à essence.
- Billonnage : découpe des troncs en sections appelées billons, fait à la tronçonneuse, effectuée au moyen d'une tronçonneuse à essence.
- Débardage : transport des billons jusqu'à un lieu de chargement pour le transport, réalisé avec un tracteur diesel équipé d'une pince de débardage.
- Deux tôles de revêtement : 0,858 x 0,818 m et 0,506 x 0,443 m.

L'étude [26] qui porte sur l'impact de l'exploitation forestière avec différents degrés de mécanisation s'est intéressée à un système d'exploitation similaire à celui de notre cas d'étude. Cette étude montre que, pour une tonne de bois vert sous forme de billon débardé, les consommations du tracteur et de la tronçonneuse sont les suivantes :

Machine	Fuel	Huile de chaîne	Huile hydraulique	Graisse
Tronçonneuse	0,1	0,065	/	/
Tracteur	0,675	/	0,0105	0,0009

TABLE 3.3 – Consommation de carburant et de lubrifiant en kilogrammes par tonne de bois vert

Production des bûches

Une fois les billons transportés jusqu'au lieu de chargements, ils sont transformés en bûches à l'aide d'un processeur automatique. Cette machine est alimentée en électricité basse tension. Nous n'avons pas d'informations spécifiques sur le modèle du processeur. L'étude [27] considère le modèle Auto split 650 qui consomme 15,9 kWh par tonne de bois de vert traitée.

Transport des bûches

Ensuite, vient le transport des bûches jusqu'au domicile. Dans notre cas d'étude le bois provient d'une forêt située à 10 km de l'habitation. Le transport se fait au moyen d'un pick-up et d'une remorque pouvant transporter 1300 kg (1,5 stère) de

bois vert.

Le modèle est un Ford Ranger alimenté en Diesel B7 [30]. Sa consommation à vide est de 11,9 L pour 100 km. Nous l'estimons à 15 L pour 100 km avec la remorque chargée. Ainsi, 2,08 L de Diesel seront nécessaires pour la livraison d'une tonne de bois vert à 10 km depuis le lieu de l'exploitation forestière.

Combustion

Lors de la combustion du bois, comme dans toute combustion, du CO_2 est rejeté. Ce CO_2 provient du carbone qui a été capté en amont par la forêt pendant la croissance des arbres grâce à la photosynthèse, et on appelle cela le CO_2 biogénique. Celui-ci n'est pas comptabilisé dans les émissions nettes de CO_2 , car on suppose qu'il a été préalablement capté dans l'atmosphère par les arbres au cours de leur croissance. Cette hypothèse n'est valable que si la forêt d'où provient le combustible est gérée de manière durable. Cela signifie que la quantité de CO_2 contenue dans la forêt au fil du temps, doit être constante ou augmenter.

La fiche technique [31] du Medi Batchclock fournit les données suivantes à propos des émissions lors de la combustion :

Émission	Valeur	Unité
CO	870	$\frac{mg}{MJ}$
NO_x	91	$\frac{mg}{MJ}$
PM	22	$\frac{mg}{MJ}$
COV	54	$\frac{mg}{MJ}$

TABLE 3.4 – Émissions moyennes du foyer du Medi Batchblock

Le CO_2 n'est pas le seul gaz à effet de serre émis lors de la combustion du bois, on retrouve aussi du CH_4 qui lui doit être comptabilisé dans l'évaluation du PRG. Cette donnée n'est pas fournie dans la fiche technique du poêle. Le CH_4 et le CO sont des produits d'une combustion incomplète. Le CH_4 et le CO sont des produits de la combustion incomplète. Étant donné que les émissions de CO sont un excellent indicateur de la qualité de la combustion, il serait pertinent d'utiliser les données d'émissions de CH_4 d'un foyer dont les émissions de CO sont similaires à celles du Medi Batchblock. C'est le cas du poêle WABI 6 kW dont les émissions sont détaillées dans l'étude [27]. Les émissions de méthane sont ainsi de 0,3672 kg de méthane par tonne de bois vert.

Il reste un dernier gaz qui a un impact sur le PRG. Il s'agit du CO lui-même. En effet, bien qu'il ne soit pas directement un gaz à effet de serre, il a tout de même un pouvoir de réchauffement indirect. L'article [32] nous explique que le CO

augmente la durée de vie du CH_4 présent dans l'atmosphère et qu'il est également susceptible de produire de l' O_3 , qui est un gaz à effet de serre. Il est donc nécessaire de considérer les émissions de CO dans l'évaluation du PRG. Le Tableau 3.4 nous indique une valeur de 870 mg de CO par MJ. Cela équivaut à 7,939 kg de CO par tonne de bois vert.

Le tableau nous fournit également, les données d'émissions de COV, de micro-particules, et de NO_x . Si on ramène ces données à la tonne de bois vert de hêtre, cela nous donne 830,42 g pour les NO_x , 200,76 g pour les PM et 492,78 g pour les COV. Les HAP ne sont pas renseignés dans la fiche technique du Medi Batchblock et seront négligés dans cet inventaire.

3.3 Evaluation des impacts

3.3.1 Cycle de vie du poêle

Comme expliqué précédemment, en l'absence de FDES, les DED sont utilisées afin d'évaluer l'impact de chaque constituant. Dans notre cas d'étude aucun des constituants ne disposant de FDES, une DED a donc été utilisée pour chacun d'entre eux. Cependant, pour la plupart des DED l'indicateur d'impact sur la pollution de l'air n'y figure pas. Le choix a donc été de considérer que la contribution du cycle de vie du poêle sur la pollution atmosphérique, est négligeable par rapport aux contributions du reste du cycle de vie total. Cette hypothèse sera discutée plus tard. Le tableau 3.5 présente le PRG de chaque éléments constituant le poêle.

3.3.2 Cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur

Exploitation forestière

L'étude [26] fournit également des chiffres sur les indicateurs d'impact des opérations d'exploitation forestières. Concernant les PRG, il est de 3,412 $\text{kgCO}_2.\text{eq}$ par tonne de bois vert. Quant à la pollution de l'air elle est de 171,5 m^3 d'air par tonne de bois vert.

Production des buches

L'électricité qui alimente le processeur de bûches est belge et sa production est décrite en section 3.1.5. Pour chaque tonne de bois vert traitée cela génère 2,846 $\text{kgCO}_2.\text{eq}$ et un volume équivalent de 684 m^3 pour la pollution atmosphérique.

<i>Constituants</i>	Briques réfractaire + Mortier [19]	Trappes Portes du foyer [20]	Vitre foyer [22]	Tôles de revêtement [21]	Fumisterie [23]
Unité de référence	0.995 kg _{briques} + 0.005 kg _{mortier}	m ²	m ²	m ²	m
A1 Extraction matières premières	1,437	100,0	8,81	80,1	71,6
A2 Transport vers fabricant					
A3 Fabrication					
A4 Transport vers chantier	0,317	8,19	0,432	6,15	9,14
A5 Installation					
B2 Maintenance	0	0	0,0775	0	135,0
C1 Déconstruction	0,080	5,64	0	7,90	1,47
C2 Transport vers traitement			0,0451		
C3 Traitement			0,00618		
C4 Elimination			0,0402		
Quantité	1440	0,47	0,926	0,119	13
Total	2640,96	53,50	1,12	87,183	2823,73

TABLE 3.5 – PRG des différents constituants du poêle exprimés en kgCO₂.eq

Transport des buches

Pour le transport, le facteurs d'émission [29] est de 3,255 kgCO₂.eq³ par L de Diesel. Il y a donc 6,770 kgCO₂.eq émis par tonne de bois vert livrée au domicile. Concernant la pollution de l'air, nous n'avons pas de données précises mais nous savons que le véhicule utilisé est de type EURO 5, ce qui indique que les émissions de particules admissibles sont de 5 mg de PM, 500 mg de CO et 180 mg de NO_x par km parcouru. Cela correspond à 6300 m³ d'air équivalent.

Combustion

La valeur de PRG considérée pour le CH₄ est de 28 ([33]). Selon les études relayées dans l'article [32], le PRG du CO prend des valeurs allant de 1,0 à 3,0. Nous retiendrons donc un PRG de 2,0. Ainsi, l'impact des émissions de ces deux gaz lors de la combustion du bois est estimée à 26,160 kgCO₂.eq par tonne de bois vert.

Concernant la pollution atmosphérique, les volumes d'air équivalents traduisant la pollution atmosphérique dues aux émission de CO, COV, NO_x et de PM lors de la combustion d'une tonne de bois vert sont présentés dans le tableau 3.6.

3. Ce facteur inclut les émissions "well-to-tank" (liées à la production du carburant) et "tank-to-wheel" (liées à sa combustion), comme c'est le cas pour tous les carburants étudiés.

Émission	Valeur	Unité
CO	$7,939.10^5$	m ³ d'air
NO _x	$27,680.10^6$	m ³ d'air
PM	$10,038.10^6$	m ³ d'air
COV	$4,928.10^5$	m ³ d'air

TABLE 3.6 – Volume d'air équivalent du à la pollution atmosphérique des émissions de combustion

3.4 Résultats

Nous allons maintenant présenter les résultats en les rapportant à l'unité fonctionnelle, qui est le kWh thermique fourni par le poêle.

3.4.1 Cycle de vie du poêle

Le total des émissions de gaz à effets de serre lors du cycle de vie du poêle est de 5661,113 kgCO₂.eq. Cependant, l'impact environnemental du poêle ne doit pas être évalué uniquement sur la base de ses émissions instantanée, mais plutôt en tenant compte de la production qu'il génèrera sur l'ensemble de sa durée de vie. Dans notre cas d'étude, une flambée quotidienne est réalisée du mois de novembre jusqu'au mois de mars inclus (151 jours par an). Elle est biquotidienne en cas de température négative. Comme expliqué en 3.1.1 chaque flambée consomme 12 kg de bois sec⁴. Cela représente une consommation annuelle de 2016 kg. Dans notre cas d'étude, l'essence de bois utilisée est le hêtre, et le rendement de notre poêle est de 80 %, cela représente 300,625 MWh d'énergie thermique émise sur 50 années de fonctionnement. L'impact environnemental du cycle de vie du poêle est ainsi de 0,0188 kgCO₂.eq par kWh.

3.4.2 Cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur

Concernant le cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur, en additionnant les impacts des différents processus du cycle on obtient 39,188 kgCO₂.eq par tonne de bois vert. Cela équivaut à 0,0193 kgCO₂.eq par kWh.

Pour ce qui est de la pollution atmosphérique générée par le cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur, elle est de 19235 m³ d'air par kWh.

4. 20 % d'humidité

3.4.3 Répartition de l'impact environnemental des différents processus du cycle de vie total

Pouvoir de réchauffement global

Sur la figure 3.3 on peut observer la contribution de chaque processus du cycle de vie total dans l'impact sur le pouvoir de réchauffement global. Le cycle de vie du poêle représente un peu moins de la moitié de l'impact sur le PRG du cycle de vie total. Concernant le cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur, un tiers du PRG est causé par la chaîne d'approvisionnement du bois et les deux-tiers restant proviennent de la phase de combustion.

En fin de compte, sur le cycle de vie total, 0,0344 kgCO₂.eq seront émis par kWh

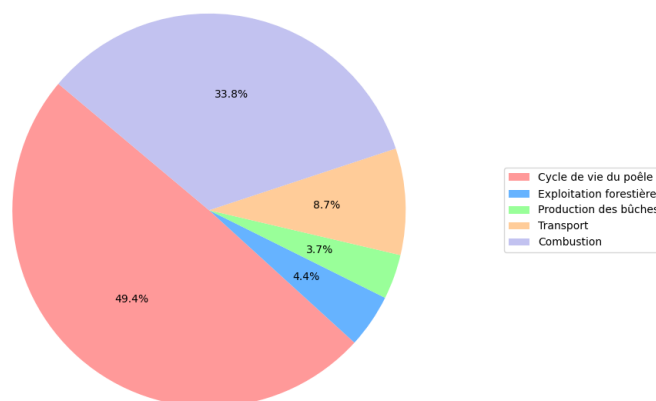


FIGURE 3.3 – Contribution des différents processus dans le PRG

thermique fourni par le poêle.

Pollution atmosphérique

L'impact sur la pollution atmosphérique est principalement dû au processus de combustion, tandis que le reste de la chaîne d'approvisionnement du bois est insignifiant, représentant moins de 0,1 % de la pollution sur l'ensemble du cycle du bois jusqu'à la chaleur. Ce constat valide notre hypothèse selon laquelle la contribution du cycle de vie du poêle à cet indicateur peut-être négligée, étant également dominée par la combustion.

Les différentes contributions à la pollution atmosphérique des espèces émises lors de la combustion sont représentées à la figure 3.4. Les émissions ayant le plus d'impact sur la qualité de l'air sont les oxydes d'azote, représentant 71 % de l'impact. Ensuite on retrouve les microparticules qui forment environ un quart de

l'impact sur l'atmosphère. Les émissions de CO et de COV n'ont qu'un faible effet sur la pollution de l'air.

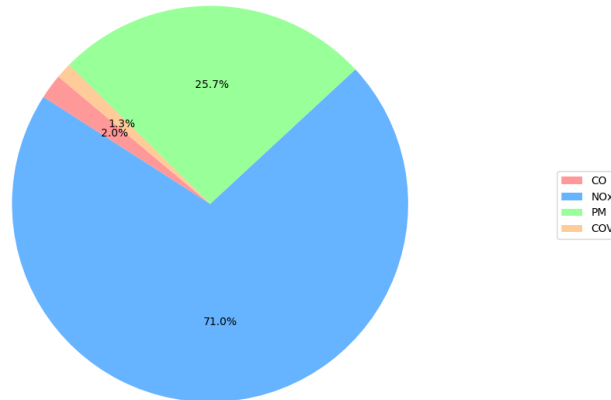


FIGURE 3.4 – Contribution des différents polluants atmosphériques

Au final, sur le cycle de vie total, la pollution atmosphérique se chiffre à un volume d'air équivalent de $19,23 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ par kWh thermique fourni par le poêle.

3.5 Analyse de sensibilité

3.5.1 Alternative dans les matériaux

Comme le montre le tableau [3.5](#), les deux constituants qui contribuent le plus au PRG sont la brique réfractaire et la fumisterie. Ensemble ils représentent un peu moins de la moitié des émissions de gaz à effet de serre du cycle de vie du poêle. Il est donc intéressant d'explorer d'éventuelles adaptations pour ces deux constituants afin réduire leur impact.

La fumisterie d'une installation est spécifiquement conçue pour s'adapter à la configuration unique de la maison. En raison de cette personnalisation, la longueur de conduit n'est pas modifiable. De plus, pour des raisons de sécurité il est impératif de conserver du conduit double-paroi. L'adaptation de la fumisterie semble donc compromise.

Cependant, en ce qui concerne la brique réfractaire, il est courant de la combiner avec des briques en terre crue. La brique réfractaire reste principalement utilisée pour les zones nécessitant une résistance à haute température, tandis que la couche d'habillage externe peut être maçonnée avec des briques en terre crue. Nous faisons l'hypothèse que 20 % de la masse de briques réfractaires peut être remplacée. Contrairement aux briques réfractaires qui sont cuites au four à des

températures allant de 1200 à 1400 °C, les briques en terre crue sont simplement séchées à l'air ambiant. Cela réduit considérablement leur impact lors de la phase de production. Comme le montre la DED [40], le processus de fabrication de la brique en terre crue est de 0,0599 kgCO₂.eq par kg. Cet impact est donc réduit de 96 % par rapport à la brique réfractaire. La figure 3.5 illustre la comparaison entre le poêle constitué uniquement de briques réfractaires et celui composé de 80 % de briques réfractaires et 20 % de briques en terre crue. Ce changement engendre une diminution relative de 4,5 % sur cycle de vie total analysé.

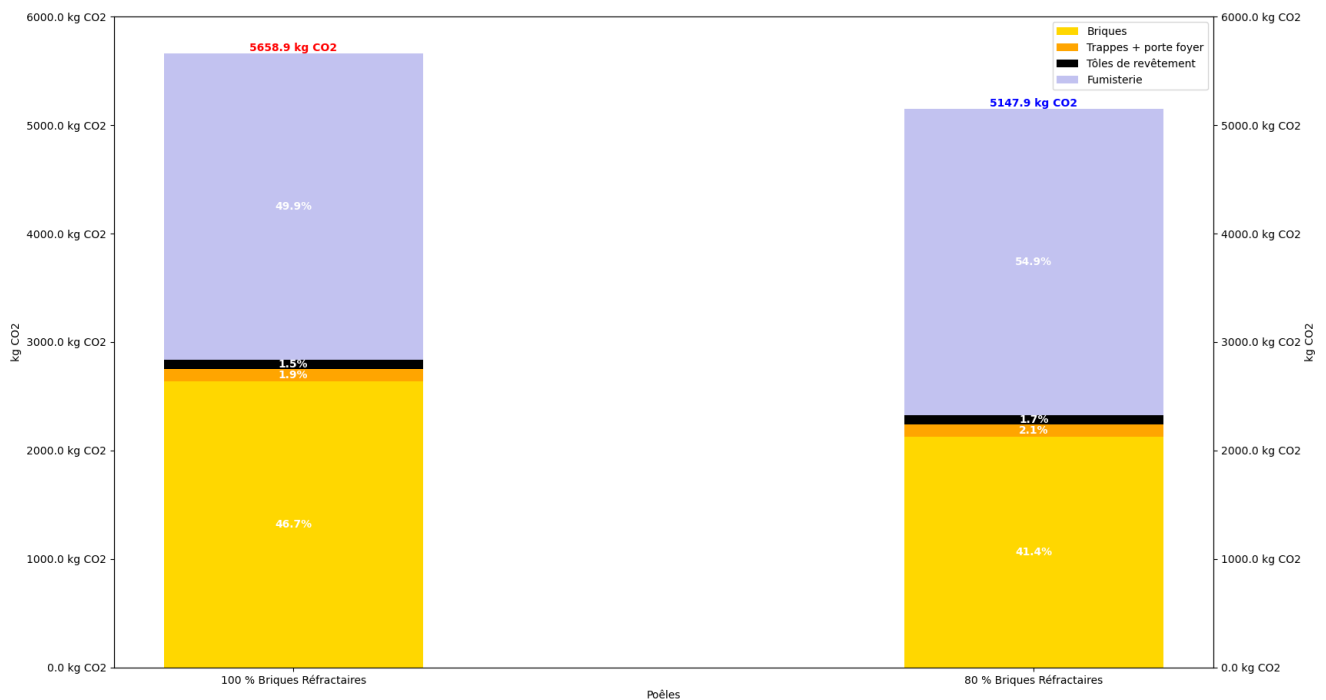


FIGURE 3.5 – Poêle full réfractaire et 20 % terre crue

3.5.2 Niveau de mécanisation de l'activité forestière

Dans notre cas d'étude, le niveau de mécanisation de l'activité forestière est relativement faible par rapport à celui observé chez la plupart des exploitants forestiers. L'étude [26] s'est aussi intéressée à un système d'exploitation avec un haut niveau de mécanisation.

Les étapes d'abattage, d'ébranchage, d'étêtage et de billonage sont effectuées par une unique machine abatteuse-groupeuse. Une fois traitées les grumes sont transportées par un porteur à huit roues vers le lieu de chargement pour le transport.

Au vu de la dominance de la phase de combustion des émissions de polluants, nous allons nous focaliser sur l'impact de PRG pour cette analyse de sensibilité. La figure 3.6 représente la nouvelle répartition des émissions de gaz à effets de serre avec le processus d'exploitation forestière hautement mécanisé en comparaison avec celui faiblement mécanisé. Les PRG dû à l'exploitation forestière passe de 0,00168 à 0,000787 kgCO₂.eq par kWh. La réduction relative de l'impact sur le PRG du cycle de vie total analysé est seulement de 2,6 %.

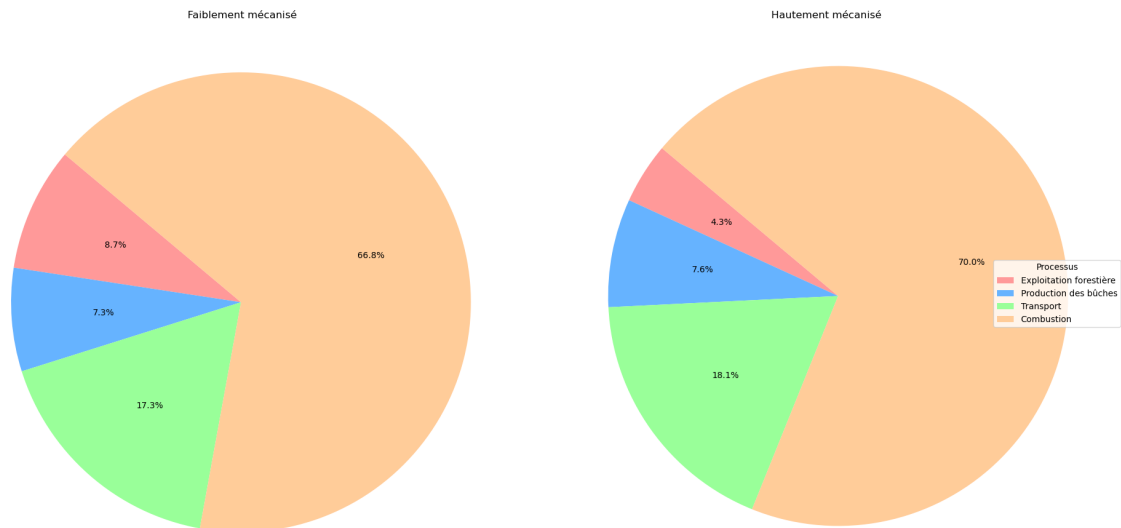


FIGURE 3.6 – Répartition du PRG des différents processus du cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur

3.5.3 Transport

Dans notre cas d'étude, le processus de transport comprend seulement 10 km et se fait directement depuis la forêt. Cependant, cette situation n'est pas représentative de la réalité de toute personne désirant se chauffer au bois. En effet, nombreuses sont celles qui ne vivent pas à proximité d'une forêt, ce qui complique l'accès direct au combustible. Pour les personnes vivant en ville, il est difficile d'imaginer un approvisionnement aussi facile. De plus, il est courant d'avoir un intermédiaire entre l'exploitant forestier, qui produit les grumes, et le consommateur. Ce rôle est assuré par le producteur de bois de chauffage, qui transforme les grumes en bûches dans son usine avant de les livrer aux consommateurs.

Approvisionnement via un producteur de bûches

L'étude [27] s'est intéressée à la société d'exploitation forestière de Haute Alsace, où le transport des grumes depuis les forêts jusqu'à l'usine de production, ainsi que le transport des bûches jusqu'au client, représentent chacun une distance moyenne de 50 km. Nous faisons l'hypothèse que le transport des grumes vers l'usine s'effectue à l'aide d'un camion ayant une capacité de charge utile de 28 tonnes. Le transport des bûches chez les clients est réalisé avec un camion plus modeste, ayant une capacité de charge utile de 7,5 tonnes. Pour ces deux types de poids lourds, on retrouve dans la base de données [35] les facteurs d'émission correspondant qui sont respectivement : 0,105 et 0,256 kgCO₂.eq par tonne transportée sur 1 km. Sur la figure 3.7 on peut observer la nouvelle répartition du PRG des différentes étapes dans la chaîne du bois dans le scénario de transport que nous venons de décrire. La part de celui-ci subit une nette augmentation. Cela met en

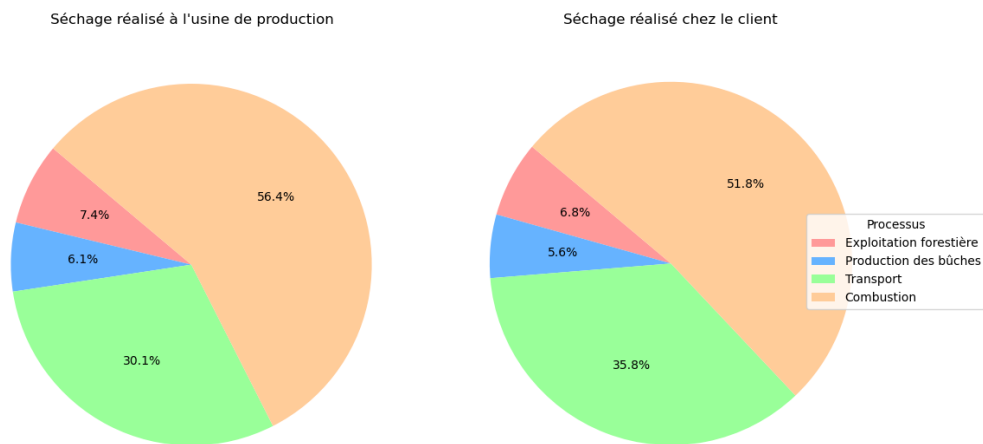


FIGURE 3.7 – Répartition du PRG des différents processus du cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur

évidence le caractère exceptionnel qu'avait la faible distance parcourue lors de la livraison du combustible dans notre cas d'étude initial. Les deux diagrammes de la figure 3.7 illustrent deux scénarios : l'un où le séchage naturel est effectué sur le site de l'usine, et l'autre où il est réalisé chez le client, impliquant ainsi le transport de bois vert chez le client. Le séchage des bûches à l'usine permet d'augmenter la densité énergétique du combustible avant son transport, ce qui a logiquement un effet positif sur l'impact environnemental du transport. L'impact sur le PRG du

transport est de 0,00890 kg CO₂.eq par kWh sans séchage à l'usine et de 0,00688 kgCO₂.eq par kWh avec séchage sur place. L'augmentation relative du PRG sur le cycle de vie total est de 16,2 % sans séchage à l'usine mais se limite à 10,3 % lorsque les bûches sont séchées sur le site de production.

Approvisionnement maintenu avec le pick-up et la remorque

Il serait intéressant d'examiner l'évolution de l'impact sur le PRG lorsque l'approvisionnement en bois est effectué directement depuis la forêt, même si le domicile est éloigné de la source de combustible. Dans ce scénario, on maintient l'utilisation d'un pick-up et d'une remorque, sans recourir à un producteur de bûches intermédiaire. Etant donné que les grumes ne passent pas par l'usine mais sont directement transformées en bûches sur le site d'extraction, on peut réduire le transport total de l'analyse précédente qui était de 100 km. Nous faisons l'hypothèse que l'évitement du détour par l'usine réduit la distance de transport de 25 km. La figure 3.8 représente la répartition du PRG dans ce scénario.

L'impact sur le PRG du transport est de 0,025 kgCO₂.eq par kWh dans cette

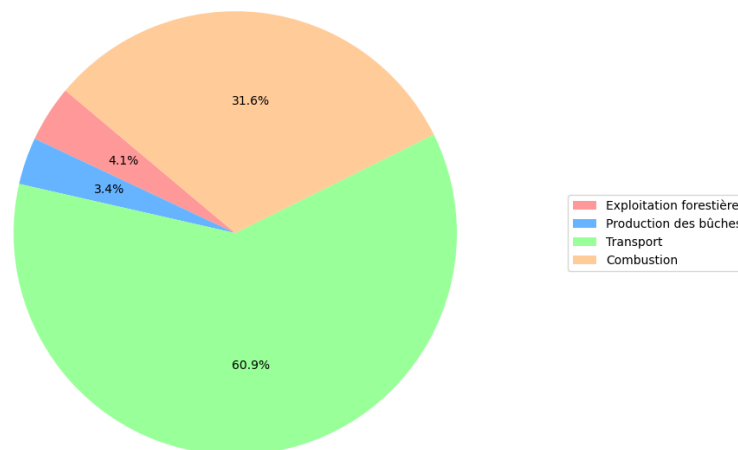


FIGURE 3.8 – Répartition du PRG des différents processus du cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur

situation. L'augmentation relative du PRG du cycle de vie du bois jusqu'à la production de chaleur est de 63,0 % par rapport au scénario incluant le passage par une usine de production. Cela montre qu'au-delà d'une certaine distance, il est préférable de passer par un producteur de bûches. Bien que cela augmente la distance totale de transport, les moyens de livraison de l'intermédiaire réduisent considérablement l'impact du transport du combustible jusqu'au domicile par rapport à un

pick-up équipé d'une remorque.

3.6 Comparaison avec d'autres systèmes de chauffage

3.6.1 Pompe à chaleur

La comparaison va être faite avec une pompe à chaleur air/eau de 5 kW. Son espérance de vie est estimée à 17 ans. Étant donné que, comme pour le poêle, l'analyse se fait sur 50 ans, trois pompes à chaleur seront nécessaires sur cette période. L'alimentation électrique de la pompe à chaleur proviendra du mix belge. Le SCOP⁵ d'une pompe à chaleur, puisant la chaleur dans l'air extérieur d'un climat tempéré comme la Belgique, est compris entre 4,4 et 5,1 ([42]).

En examinant le cycle de vie ([41]) de la pompe à chaleur, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie (du berceau à la tombe), et sans prendre en compte encore l'étape B6 (utilisation de l'énergie durant l'étape d'utilisation), l'impact sur le PRG est de 5040 kgCO₂.eq.

Pour ce qui est de la pollution atmosphérique sur le cycle de vie de la pompe, elle est de 376000 m³ d'air. Comme indiqué dans [44], la pollution engendrée par la production électrique est de 43 m³ d'air par kWh électrique fourni.

3.6.2 Chaudière à gaz

Nous allons également nous intéresser à une chaudière à gaz classique⁶ de rendement de 90 % et de puissance utile de 12 kW, avec un circuit de chauffage par le sol. Son espérance de vie est estimée à 17 ans. Pour couvrir les 50 ans d'analyse trois chaudières seront nécessaires. La chaudière est alimentée en gaz naturel dont les données environnementales sont renseignées sur la fiche [45].

En examinant le cycle de vie de la chaudière [46], de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie, les émissions de gaz à effet de serre sont de 1330 kgCO₂.eq. Pour ce qui est de la consommation de gaz, la mise à disposition de chaque kWh par la combustion de gaz naturel émet 0,243 kgCO₂.eq.

Concernant la pollution atmosphérique causée par le cycle de vie de la chaudière, elle est estimée à 232000 m³ d'air. Pour l'approvisionnement et la combustion du

5. Le SCOP (Seasonal Coefficient of Performance) est une mesure de l'efficacité énergétique d'une pompe à chaleur sur une saison de chauffage complète, indiquant combien de kWh de chaleur est produit par kWh d'électricité consommé

6. Il ne s'agit pas d'une chaudière à condensation ou à basse température

gaz, chaque kWh de propane brûlé génère une pollution atmosphérique d'un volume équivalent de 5,7 m³ d'air.

3.6.3 Poêle traditionnel

Il est intéressant de comparer le poêle de masse avec un poêle à bois étanche moderne. Il s'agit d'un appareil d'un foyer en métal isolé à l'intérieur avec des laines minérales, et équipé d'un habillage très léger⁷. La base Inies contient la DED [\[47\]](#), qui décrit l'impact environnemental d'une installation de ce type avec une puissance de 6 kW d'une durée de vie de 16 ans. Cette déclaration indique un PRG de 794 kg CO₂.eq et une pollution atmosphérique d'un volume d'air équivalent de 214000 m³. Ces indicateurs ne prennent pas en compte l'étape B6 (alimentation en énergie de l'appareil) du cycle de vie.

Un exemple de ce type de poêle est le WABI 6 kW. Sa fiche technique [\[48\]](#) annonce un rendement de 79 %. Nous faisons l'hypothèse que la chaîne d'approvisionnement du bois sera la même que dans l'exemple du poêle de notre cas d'étude. Nous reporterons donc ici les impacts environnementaux trouvés précédemment. Comme expliqué en [3.2.2](#), étant donné que les émissions de CO du WABI sont similaires à celles du Medi Batchblock, la qualité de la combustion sera similaire. Ainsi, on fait l'hypothèse que la pollution atmosphérique due à la combustion sera similaire pour les deux foyers.

3.6.4 Discussion des résultats

Les résultats qui illustrent l'impact environnemental des différents systèmes de chauffage examinés dans cette section sont repris dans le tableau [3.7](#) et sont visibles sur la figure [3.9](#).

Système de chauffage	Pouvoir réchauffement global [$\frac{\text{kg CO}_2.\text{eq}}{\text{kWh}}$]	Pollution atmosphérique [$\frac{\text{m}^3 \text{ d'air.eq}}{\text{kWh}}$]
Poêle de masse	0,0381	15387
Pompe à chaleur	0,0879	44
Chaudière à gaz	0,2833	9
Poêle traditionnel	0,0299	15387

TABLE 3.7 – Impacts environnementaux des systèmes de chauffage

Pouvoir de réchauffement global

Le premier élément que l'on peut observer est que, comparativement à la chaudière à gaz, l'impact sur le PRG du poêle de masse est nettement inférieur. Les

7. Contrairement au poêle de masse il n'est pas habillé d'un matériau accumulateur de chaleur.

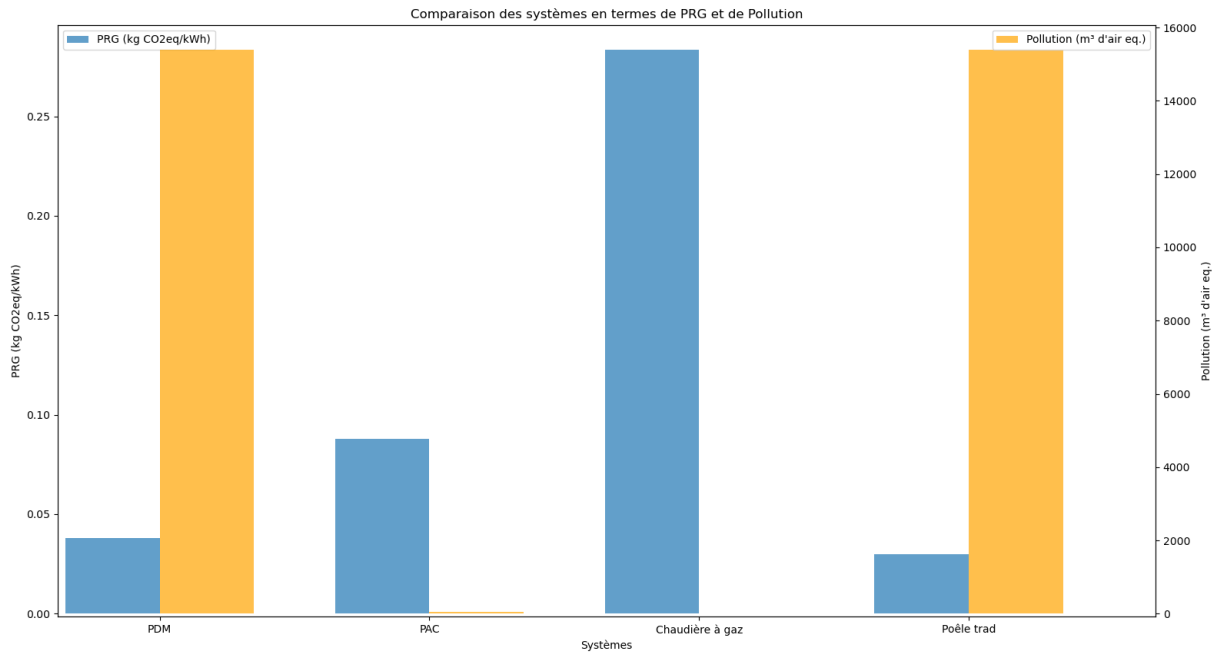


FIGURE 3.9 – Comparaison des impacts environnementaux des systèmes de chauffage

émissions de gaz à effet de serre sur le cycle de vie total d'une chaudière à gaz sont plus de 7 fois supérieures à celles d'un poêle de masse.

Le chauffage au moyen d'une pompe à chaleur, bien que moins émetteur de gaz à effet de serre que la chaudière, présente tout de même un impact sur le PRG plus de deux fois supérieur que le poêle de masse.

Concernant le poêle à bois traditionnel, on observe un impact sur le PRG légèrement inférieur. Etant donné que le cycle de vie du bois jusqu'à la chaleur considéré est le même que pour le poêle de masse, cette différence vient de l'impact de l'infrastructure. En effet, malgré son espérance de vie limitée, l'infrastructure du poêle traditionnel a un moindre impact sur le PRG.

Pollution atmosphérique

En ce qui concerne l'impact de la pollution de l'air, l'impact des émissions du poêle de masse et du poêle traditionnel sont de l'ordre de 10^4 m³ d'air équivalent par kWh, tandis que celles de la chaudière à gaz et de la pompe à chaleur sont de l'ordre de 10^1 m³ d'air équivalent par kWh. Les deux systèmes de chauffage

au bois présentent de piètres performance en terme de pollution atmosphérique, comparés à la PAC et la chaudière.

Conclusion

En termes d'émissions de gaz à effet de serre par unité de chaleur fournie, le poêle de masse et le poêle traditionnel sont plus intéressants que la chaudière à gaz et la pompe à chaleur. Cependant, l'impact sur l'environnement ne se limite pas au PRG. En effet, les deux systèmes de chauffage au bois ont un impact sur la pollution de l'air bien plus important que les deux autres.

Toutefois, il est nécessaire de nuancer quelque peu ces résultats. Tout d'abord pour les poêles traditionnels, les données de performance sur les émissions de polluants atmosphériques proviennent de tests effectués en laboratoire par le fabricant. Ceux-ci sont réalisés avec un poêle fonctionnant à plein régime, une situation qui n'est pas rencontrée en pratique pour ce type d'appareil. La raison en est expliquée en section 4.2 du chapitre suivant. Comme l'indique le tableau 3.12, une combustion en sous-régime augmente considérablement les émissions de la plupart des polluants atmosphériques. Le rendement de l'installation est également diminué ce qui accroît l'impact sur le PRG.

De plus, les valeurs d'impact obtenues pour les différents systèmes sont exprimées par rapport à chaque kWh thermique fourni par l'installation. Il est donc pertinent de s'interroger sur la tendance de chaque type de chauffage à être sollicité plus ou moins intensément dans la pratique.

Toutefois, il est évident que l'impact sur la pollution de l'air est un enjeu majeur pour les systèmes de chauffage qui repose sur la combustion du bois. C'est ce sujet que nous aborderons dans la section suivante.

3.7 Pollution atmosphérique des systèmes de chauffage au bois

3.7.1 Polluants atmosphériques issus de la combustion du bois

La combustion du bois est un processus au cours duquel des polluants atmosphériques sont émis. Il y en a cinq principaux.

Monoxyde de carbone

Le CO est un produit de combustion incomplète. Il s'agit d'un polluant gazeux qui est incolore, inodore et insipide, non irritant et donc indétectable⁸. Il cause de nombreuses intoxications domestiques, qui peuvent être mortelles en cas de doses trop importantes.

Particules fines

Les particules fines comprennent la suie (carbone noir), produit de la combustion incomplète, ainsi que des cendres volatiles qui forment des particules inorganiques. Du point de vue de la santé, elles sont préoccupantes en raison de leur petite taille, inférieure à 10 micromètres (PM10), et de leur composition chimique. Leur petite taille permet de les inhaler profondément, ce qui favorise l'apparition du cancer du poumon. Plus les particules sont fines, plus elles pénètrent facilement dans l'organisme et plus elles sont dangereuses.

Oxyde d'azote

Les NO_x sont formés par deux mécanismes principaux. Il y a le NO-thermique : à cause des températures élevées qu'atteint l'air dans le foyer, l'azote qu'il contient s'oxyde. Et il y a le NO-combustible : les substances azotées présentes dans le combustible se dégradent en d'autres espèces et les molécules azotées s'oxydent pour former du NO_x. Les oxydes d'azote ont pour effet d'irriter les voies respiratoires.

Composés organiques volatils

Les composés organiques volatils (COV) sont des composés formés d'au moins un atome d'hydrogène et de carbone. La combustion incomplète du bois est à leur origine. Le point d'ébullition des COV se trouve entre 50 et 260 °C, ce qui facilite l'évaporation ou la sublimation⁹ dans l'atmosphère. Les COV émis lors de la combustion du bois peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine, notamment un risque accru de cancers. Ils peuvent provoquer des irritations des voies respiratoires, des yeux et de la peau, entraînant des symptômes comme des maux de tête et des étourdissements. De plus, certains COV ont des effets toxiques sur des organes tels que le foie, les reins, le cœur et le système nerveux ainsi que sur la moelle osseuse et le système reproducteur.

8. A moins d'un appareil détecteur

9. Passage direct de l'état solide à gazeux

Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des composés chimiques formés de plusieurs cycles aromatiques^[10] fusionnés, composés exclusivement de carbone et d'hydrogène. Il existe plusieurs types de HAP. Le benzo[a]pyrène est un cancérogène avéré pour l'homme (groupe 1 du CIRC^[11]) tandis que les trois autres HAP sont probablement cancérogènes pour l'homme (groupe 2A du CIRC).

3.7.2 Impact du chauffage domestique au bois sur la pollution atmosphérique globale

Le chauffage au bois n'est pas la seule source de pollution de l'air. En effet, d'autres secteurs comme celui du transport ou encore l'agriculture contribuent aux émissions de polluants atmosphériques. Le rapport [49] de 2024 fournit des données détaillées concernant les émissions de polluants atmosphériques sur l'année 2022 en France. Celles-ci sont également détaillées secteur par secteur. Ces données sont illustrées à la figure 3.10.

10. Un cycle aromatique est une structure chimique cyclique composée d'atomes de carbone liés par des liaisons covalentes, possédant une stabilité particulière grâce à la délocalisation des électrons pi au sein du cycle.

11. Centre International de Recherche sur le Cancer)

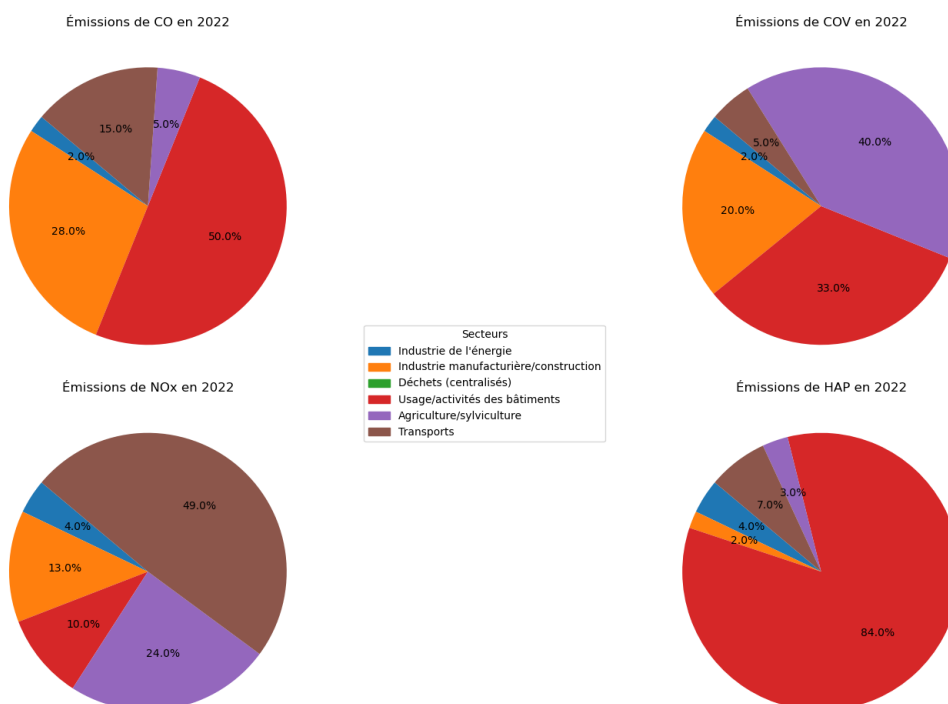


FIGURE 3.10 – Répartition des émissions de polluants des différents secteurs

Concernant les particules fines, nous examinerons l'évolution de la répartition des émissions des différents secteurs en faisant varier la taille des particules, comme le montre la figure 3.11. On observe que, à l'exception des NO_x, l'activité et l'utilisation des bâtiments contribuent fortement à la pollution atmosphérique globale, avec des émissions représentant 50 % pour le CO, 33 % pour les COV, et 84 % pour les HAP. Même les NO_x, avec 10 % des émissions, représentent une part significative. En ce qui concerne les particules fines PM10, l'activité des bâtiments représente presque la moitié des émissions. De plus, en se focalisant sur les particules de plus petite taille (PM2.5 et PM1), on remarque que la proportion causée par l'utilisation des bâtiments augmente. Cela est préoccupant, sachant que plus elles sont petites, plus elles sont néfastes pour la santé humaine.

Cependant les émissions liées à l'activité et à l'utilisation des bâtiments ne sont pas toutes causées par la chauffage domestique au bois. Il est donc nécessaire de déterminer quelle proportion de ces émissions est directement attribuable au chauffage domestique au bois dans le secteur de l'activité et l'usage des bâtiments. Le rapport [49] fournit le détail des sous-secteurs, permettant ainsi d'obtenir cette information. Ces données figurent dans le tableau 3.8.

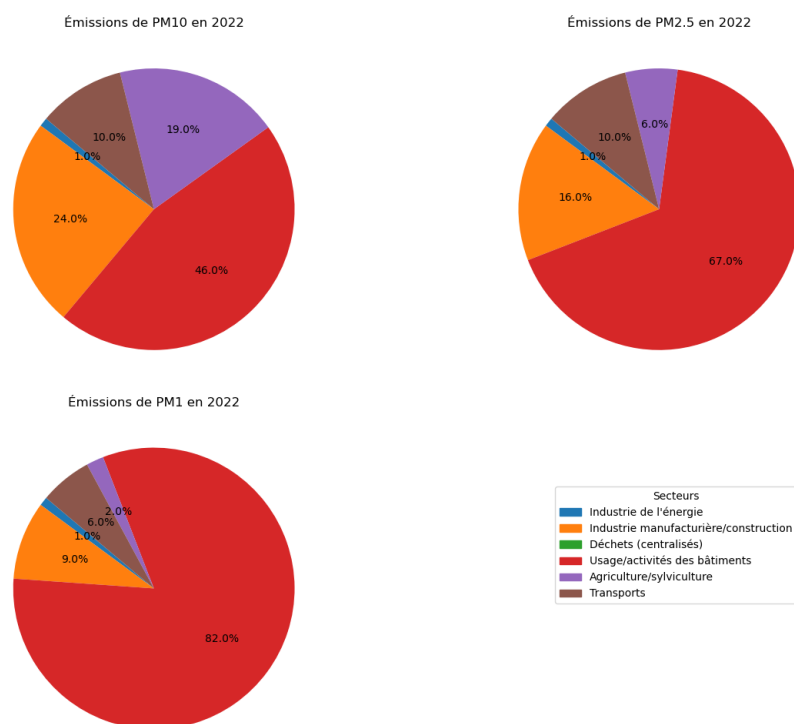


FIGURE 3.11 – Répartition des émissions de PM des différents secteurs

Polluant	Contribution chauffage au bois
CO	84,7 %
COV	41,3 %
NO _x	54,1 %
HAP	94,7 %
PM10	86,5 %
PM2.5	86,3 %
PM1	86,4 %

TABLE 3.8 – Proportion de l'impact du chauffage au bois dans l'utilisation des bâtiments

3.7.3 Moyens de réduction des émissions de polluants atmosphériques

Les produits de la combustion complète sont le CO_2 et le H_2O . Par conséquent, la présence de polluants atmosphériques résulte d'une combustion incomplète. Le moyen le plus efficace de réduire ces émissions est de garantir une combustion aussi complète que possible.

Un foyer moderne

Les foyers modernes sont conçus dans cette optique, avec un design visant à rendre la combustion aussi propre que possible. L'étude [50] compare les émissions d'un foyer moderne avec celles d'un feu ouvert et décrit une réduction de 16,6% pour le CO, de 103,8% pour les COV, de 46,19% pour les NO_x et de 3,5% pour les PM10.

Règles de bonnes pratiques

Le combustible et son utilisation influencent également grandement les émissions. Le tableau 3.12, tiré de l'étude [51], donne une idée de l'impact de différentes pratiques d'utilisation d'un foyer.

	Humidité (> 25% / 15%)	Allure (réduite / nominale)	Essence	Ecorce (avec / sans)	Mode d'allumage
CO	Forte	Forte	Moyenne	Pas d'influence	Chaud/Froid : Moyenne Bas/Haut : Forte
COVt	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Chaud/Froid : Moyenne Bas/Haut : Forte
NO_x	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Chaud/Froid : Faible Bas/Haut : Faible
PM	Forte	Forte	Forte	Forte	Chaud/Froid : Forte Bas/Haut : Forte
η	Moyenne	Moyenne	Faible	Pas d'influence	Chaud/Froid : Faible Bas/Haut : Forte

	Phases de combustion	Charge (partielle / nominale)	Plate-forme	Vieillessement du foyer (> 3 ans / neuf)
CO	Forte	Faible	Faible	Inconnue
COVt	Forte	Faible	Moyenne	Inconnue
NO_x	Moyenne	Faible	Pas d'influence	Inconnue
PM	Forte	Faible	Faible	Forte pour les appareils étanches
η	Moyenne	Faible	Faible	Inconnue

FIGURE 3.12 – Eléments influençant les performances d'un foyer

1. Humidité : taux d'humidité du combustible. Il doit être le plus faible possible.

2. Allure : vitesse à laquelle le combustible est brûlé. Pour minimiser les émissions de polluants il faut que la combustion se déroule à vitesse nominale. Pour cela il faut que le débit d'air disponible soit optimal.
3. Essence : type de bois utilisé comme combustible. Pour le chauffage domestique les feuillus durs (chêne, hêtre, frêne, charme) et tendres (aulne, bouleau, peuplier, saule, tremble) sont favorisés.
4. Mode d'allumage : l'endroit où la combustion du bois est lancée (haut ou bas). Si le combustible se trouve sur une sole¹², l'allumage doit se faire par le haut. Si le combustible est posé sur une grille surélevée par rapport à la sole, il doit être allumé par le bas.
5. Phase de combustion : étape de la combustion dans laquelle on se trouve¹³.
6. Charge : taux de chargement du foyer par rapport à la masse maximale de combustible qu'il peut accueillir.
7. Plate-forme : élément sur lequel est posé le combustible (directement sur la sole ou sur une grille surélevée).

La qualité du combustible (essence, humidité, écorce) ont une influence importante sur les émissions de polluants. Le mode d'allumage ainsi que la phase de combustion dans laquelle on se trouve font aussi varier la qualité de la combustion. Par contre, la charge et la présence ou non de la grille semblent avoir un effet limité.

Un foyer performant, bien utilisé et alimenté avec un bon combustible, permet de réduire les émissions. Cependant, même avec ces précautions, la combustion continue d'émettre des polluants. Certains dispositifs de réduction peuvent donc être envisagés. Il est toutefois essentiel de s'assurer que les impacts intrinsèques de ces modules de réduction ne dépassent pas ceux des émissions qu'ils permettent d'éviter. De plus, les coûts liés à l'installation et la maintenance ne doivent pas être trop élevés par rapport au prix total du poêle. Ainsi, la plupart des dispositifs ne sont pas adaptés aux installations de chauffage domestique. Toutefois, il existe une technologie pertinente que l'on retrouve d'ailleurs sur certains poêles de masse.

Régulateur automatique du clapet d'arrivée d'air

L'excès d'air dans le processus de combustion est un facteur déterminant pour le niveau de polluants rejetés. Une carence en oxygène conduit à une combustion incomplète, favorisant ainsi les émissions de polluants dans l'air. À contrario, un excès d'air trop important peut produire un effet semblable en abaissant la température de combustion, ce qui augmente aussi les émissions de polluants. La figure 3.13 illustre les variations des concentrations de CO et d'O₂ des fumées lors

12. base de la chambre de combustion

13. Celles-ci sont détaillées et expliquées plus loin dans cette section

d'une combustion dans un foyer dont l'ouverture du clapet de l'arrivée d'air est constante.

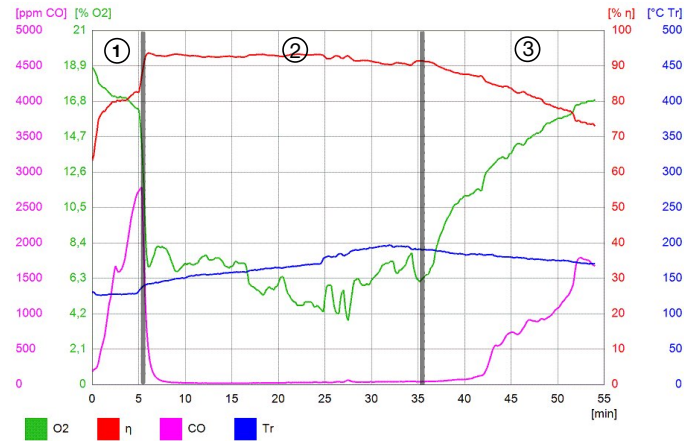


FIGURE 3.13 – Évolution des émissions de CO et O₂ pendant la combustion

La courbe verte représentant l'évolution de l'oxygène résiduel durant la combustion affiche une forme de dôme inversé. Cette évolution permet d'identifier les trois phases principales du processus de combustion :

- ① Séchage : l'eau contenue dans le combustible s'évapore. Cette phase requiert un moindre débit d'air.
- ② Combustion à haute température : la pyrolyse et l'oxydation ont lieu simultanément. La pyrolyse décompose les constituants du bois en gaz, qui sont ensuite oxydés, libérant ainsi l'énergie stockée. On observe une hausse de la consommation d'oxygène pendant cette phase.
- ③ Extinction : seules les braises restent. Après la consommation de tous les composés volatils du bois, il ne reste que le charbon qui brûle lentement, avec peu ou pas de flamme, indiquant une faible consommation d'oxygène et donc une augmentation de l'oxygène résiduelle.

La courbe de l'oxygène résiduelle illustre le fait que pour chaque instant de la combustion il y a un excès d'air optimal. En effet, lors des phases 1 et 3 le débit d'air est trop important et dégrade la qualité de la combustion (hausse des émissions de CO). L'utilisation d'un clapet manuel ne permet pas d'ajuster avec précision l'apport d'air nécessaire à chaque étape de la combustion. La figure 3.14 illustre un système de contrôle automatique du clapet de l'arrivée d'air.

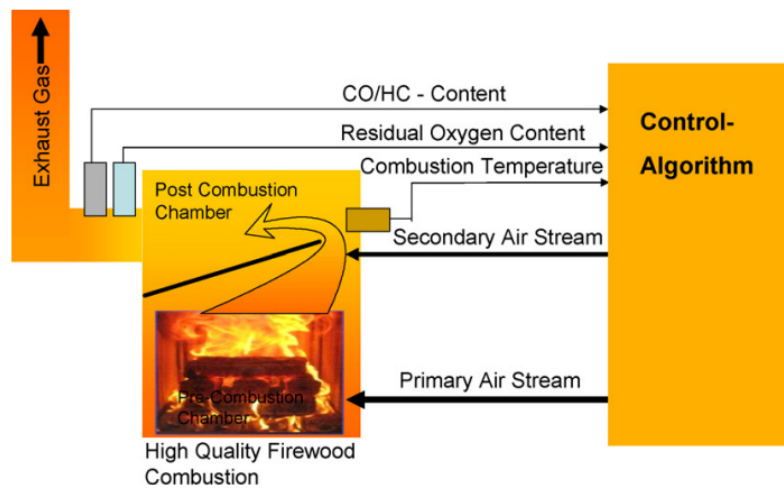


FIGURE 3.14 – Contrôle du clapet d'arrivée d'air

Les variables de contrôle comprennent :

- la température de la combustion,
- l'oxygène résiduel dans les produits de combustion,
- les émissions de monoxyde de carbone.

Ces données alimentent l'algorithme de contrôle qui détermine l'ouverture optimale du clapet d'arrivée d'air. Selon l'article [53], l'automatisation du clapet d'arrivée d'air permet de réduire de 80 % les émissions de CO par rapport à un clapet manuel.

Chapitre 4

Aspects socio-techniques autour du poêle de masse

Lors de l'évaluation d'un système de chauffage, il est fondamental d'examiner son impact environnemental par rapport à la quantité de chaleur qu'il produit, comme abordé dans le chapitre précédent. Cependant, il est tout aussi important de tenir compte de la manière dont le système est utilisé en pratique et de prendre en compte le savoir des professionnels et la diffusion des bonnes pratiques.

En effet, concernant l'utilisation, l'efficacité énergétique d'une habitation peut être améliorée en adaptant les habitudes de chauffage à l'ensemble de la maison, avec des solutions alternatives plus économes en énergie. Ensuite, certains modes de chauffage du poêle, en raison de leurs spécificités, ont tendance à être plus sollicités que d'autres. Finalement, nous examinerons l'expertise des poêliers, l'état actuel de leur profession et la manière dont elle évolue.

Dans ce chapitre, nous explorons ces différents éléments à travers une analyse qualitative, permettant de mieux comprendre les enjeux qui dépassent les aspects purement techniques. Nous examinerons trois types de spécificités qui influencent l'utilisation d'un système de chauffage.

Structure Chapitre 4

- **(1) Assurer le confort thermique avec un poêle de masse**
- **(2) Usage du poêle de masse comparée à d'autres systèmes :**
 - 2.1. Spécificités logistiques
 - 2.2. Spécificités opérationnelles
 - 2.3. Spécificités d'usage du combustible
- **(3) Expertise de la communautés de pratique**

4.1 Confort thermique avec un poêle de masse

Dans cette section, nous allons explorer comment un poêle de masse peut être utilisé pour assurer le confort thermique dans une habitation, en examinant ses avantages et les problèmes qu'il peut poser. Nous aborderons également le projet SlowHeat, qui propose des solutions pour surmonter ces problématiques. La méthodologie employée pour la rédaction de cette section comprend la lecture des documents du projet SlowHeat, une revue de littérature pertinente.

4.1.1 Définition du confort thermique

Le confort thermique est un état de satisfaction avec l'environnement thermique, qui découle d'un équilibre thermodynamique entre le corps humain et son environnement. Le corps humain fonctionne comme une machine thermodynamique qui cherche à maintenir une température interne stable. Cet équilibre thermique est influencé par six paramètres :

La chaleur émise par le corps

La quantité de chaleur émise par le corps dépend de notre niveau d'activité physique. En mouvement, le corps émet plus de chaleur qu'au repos. Tandis que lors d'un exercice physique, la production de chaleur interne augmente considérablement.

L'isolation thermique du corps

L'isolation thermique dépend de notre habillement. Des vêtements plus épais et isolants réduisent les pertes de chaleur, là où des vêtements légers permettent une plus grande dissipation de la chaleur.

La température de l'air

La température sèche de l'air ambiant joue un rôle crucial dans le confort thermique. Une température trop élevée ou trop basse peut entraîner une sensation d'inconfort thermique.

La température des parois

Les échanges de chaleur par rayonnement entre le corps et les parois environnantes sont influencés par la température de surface de celles-ci.

Le taux d'humidité de l'environnement

L'humidité relative va avoir un impact sur le confort thermique. En été, l'humidité va dégrader le confort thermique en inhibant la transpiration du corps. Lors de l'hiver où les températures sont plus basses, le taux d'humidité joue peu sur le confort thermique.

La vitesse de l'air

La vitesse de l'air environnant influence les échanges thermiques par convection entre le corps et l'environnement. Un mouvement d'air plus rapide augmente la perte de chaleur par convection.

4.1.2 Le poêle de masse : un système basse température

Le mode de transfert de chaleur du poêle de masse vers l'environnement se fait par rayonnement et par convection, à basse température. Le fait d'avoir ces deux modes de transfert à basse plutôt qu'à haute température augmente le confort thermique.

Le problème du rayonnement haute température est qu'il va créer d'importantes différences de température entre les zones visibles par le poêle et celles qui lui sont cachées. Ces différences sont fortement perceptibles et détériorent le confort thermique.

La convection haute température quand elle va, va fortement dilater l'air en le réchauffant. L'air chaud va s'élever puis refroidir et retomber. Cela va créer un phénomène de stratification thermique. Il s'agit de la formation de différentes couches d'air dont la température augmente avec la hauteur. Cela dégrade également le confort thermique.

Au vu de ces problèmes occasionnés par le chauffage haute température, il est préférable de se tourner vers des systèmes à basse température. Cependant cela requiert une plus grande surface d'échange avec l'environnement. C'est le cas du poêle de masse qui offre ainsi davantage de confort thermique.

4.1.3 Problématique des pièces périphériques

Contrairement à la plupart des types de chauffages centraux, tels que les chaudières ou les pompes à chaleur, que l'on retrouve dans les habitations des pays au climat froid ou tempéré, il est compliqué de faire migrer la chaleur générée par un poêle de masse vers des pièces qui en sont plus éloignées. Les systèmes de chauffage centralisés, comme les chaudières et les pompes à chaleur, sont conçus pour distribuer la chaleur de manière uniforme et efficace dans l'ensemble de l'habitation.

Pour y parvenir, des systèmes de distribution tels que des radiateurs ou des circuits de chauffage par le sol sont utilisés.

En revanche, un poêle de masse génère la chaleur de manière localisée en la diffusant directement par rayonnement et par convection. La chaleur produite par un poêle de masse se propage ainsi dans l'espace ouvert autour de lui. Son placement stratégique est donc au contact des pièces de vie. Les pièces adjacentes peuvent bénéficier indirectement de cette chaleur, mais l'efficacité de cette diffusion est limitée par la configuration de l'habitation et par les obstacles physiques comme les murs et les portes. Ainsi, les pièces éloignées du poêle ne bénéficient que d'un effet limité de celui-ci. Il est donc pertinent de se demander quelles solutions peuvent être adoptées pour s'adapter à cette situation dans ces pièces périphériques.

Ces pièces peuvent être rassemblées en fonction de leur contexte d'utilisation :

Chambres à coucher et bureaux : Ce sont des pièces où il est possible de passer plusieurs heures sans bouger, ce qui implique une absence d'activité physique et un positionnement fixe dans la pièce.

Salle de bain : Cette pièce humide est généralement peu occupée au cours de la journée. Cependant, lors de son utilisation, nous y sommes souvent dévêtus.

Pièces de passage : Cela inclut les couloirs, les entrées, et toutes les autres pièces utilisées de manière intermittente et pour de courtes durées.

4.1.4 Projet SlowHeat

Le projet de recherche SlowHeat [9] vise à repenser la manière de chauffer les espaces de vie. Cette initiative explore une approche bien différente de ce qui est habituellement utilisé en matière de chauffage. L'idée dans cette nouvelle approche est de dissocier le confort de la température ambiante du bâtiment afin de permettre un abaissement de celle-ci, ce qui s'accompagne d'une économie importante d'énergie.

Une pratique de chauffage actuelle inadaptée

Avec la généralisation des systèmes de chauffage central et l'amélioration de leurs performances, la température à l'intérieur des maisons a augmenté. Il est courant de rencontrer des habitations où le thermostat est réglé sur 20 [°C]. Ainsi la façon de se chauffer revient à créer un climat artificiel, fortement énergivore, à l'intérieur de la maison. Les systèmes de chauffage transmettent bien plus de chaleur à l'air ambiant et aux parois de la maison qu'à l'être humain directement. Pourtant, l'objectif d'un système de chauffage est uniquement d'assurer la satisfaction des habitants. Les systèmes de chauffage actuels semblent donc être conçus sur base d'un besoin qui n'est pas bien défini. Il n'est pas question d'une température à maintenir dans l'habitat. Le service qui doit être rendu par le système

de chauffage est uniquement d'assurer le confort thermique des personnes qui y vivent. En plus de cette habitude de température élevée, les espaces chauffés sont devenus de plus en plus conséquents.

Chauffer les corps plutôt que le bâtiment

L'idée du projet SlowHeat est de passer à des systèmes de chauffage qui se concentrent sur les corps et qui délaisse le chauffage des murs et de l'air. En pratique cela consiste donc en un habitat dont la température ambiante passera des 20 °C dont on a discuté plus tôt, à une température qui peut descendre jusqu'à minimum 12 °C. Cette valeur s'explique car elle est le seuil en-dessous duquel la respiration de l'air à une telle température peut engendrer une irritation des muqueuses des voies respiratoires. Au-dessus de cette température il n'y a pas de risque à inhaler cet air. Il est donc tout à fait possible, en garantissant le confort thermique d'une autre façon qu'en chauffant l'air ambiant, de vivre sainement dans de telles températures. Le choix entre les 12 °C et les 20 °C excessifs fréquemment rencontrés repose sur une question d'élasticité de nos normes sociales et d'organisation de nos moyens de substitutions pour assurer le confort thermique. Il s'agit donc d'une question sociologique, et non physiologique. Ainsi, le projet SlowHeat a pour but d'ouvrir l'imaginaire autour des pratique afin d'assurer l'équilibre thermodynamique du corps dans une ambiance de vie où la température est plus basse.

Un premier moyen aussi évident qu'efficace est l'habillement. Il s'agit de notre première barrière face au froid qui ne consomme aucune énergie. Il est donc nécessaire d'adapter son habillement dans la maison en fonction de la saison que l'on traverse.

Concernant le chauffage en tant que tel dans le projet SlowHeat, l'idée est d'amener directement la chaleur où elle est nécessaire et quand elle est nécessaire. Cela se fait au moyen d'appareil électriques appelés chauffages de proximité. Premièrement, il y a des technologies qui transmettent de la chaleur directement au contact du corps. Ce sont des appareils électriques qui ne dépassent pas les 100 Watts et dont l'effet est rapidement perceptible. Un autre type de chauffage de proximité sont ceux qui transmettent la chaleur par rayonnement. Il s'agit ici d'appareils de quelques centaines de Watts, dont la surface monte à haute température (entre 80°C et 90 °C) qui va transmettre de la chaleur par rayonnement à une distance de un ou deux mètres maximum.

Il est important de respecter une hiérarchie dans les 3 pratiques qui viennent d'être présentées. D'abord il faut privilégier un habillement adapté. Si cela n'est pas suffisant pour assurer le confort, vient ensuite le chauffage de proximité basse énergie au contact direct du corps. Enfin, vient la technologie de chauffage de proximité rayonnant de moyenne énergie.

Economie d'énergie grâce à la démarche

Il est légitime de se demander si la moindre sollicitation du chauffage centrale au profit de ces moyens de chauffage de proximité ne va pas être compensée par une consommation électrique nécessaire à alimenter ces appareils. La réponse est non. On remarque une économie importante d'énergie au global grâce à la pratique de la démarche SlowHeat. On peut lire [10] une économie allant de 5 à 10 % par degrés en moins au thermostat dans la maison en composant par les moyens discutés ci-dessus.

L'énergie consommée dépend à la fois de la puissance et de la durée d'utilisation, cette économie est aisément compréhensible. Comme indiqué dans la section précédente, ces appareils de proximité ont des puissances qui n'excèdent pas 100 Watts pour les modèles de contact ou quelques centaines de Watts pour les appareils rayonnant. En comparaison, un radiateur classique a une puissance allant de 1500 à 2000 Watts. Bien qu'ils ne fonctionnent pas toujours à pleine puissance, les radiateurs restent nettement plus puissants. Concernant la durée d'utilisation, un radiateur classique fonctionne en continu pour maintenir la température réglée par le thermostat, tandis qu'un appareil de proximité est utilisé uniquement lorsque l'utilisateur en ressent le besoin. Son temps de réaction rapide et son effet immédiat permettent également de réduire la durée d'utilisation. Ainsi, l'économie de puissance et de temps d'utilisation conduit à une réduction globale de la consommation d'énergie.

4.1.5 Le poêle de masse combiné à la démarche SlowHeat

Comme expliqué en [4.1.3], l'inconvénient du poêle de masse est son effet limité sur les pièces en périphérie de l'endroit où il évolue. Un moyen de pallier à ce problème est de pratiquer la démarche SlowHeat dans ces pièces qui bénéficient de moins de chauffage. Le poêle de masse doit idéalement être placé au centre des pièces de vie. Celles-ci sont souvent occupées par plusieurs personnes en même temps qui se déplacent fréquemment. Par conséquent, il peut être pertinent d'y installer un système de chauffage central qui chauffe de façon continue et diffuse la chaleur dans toute la pièce. Concernant les pièces en périphérie que sont les chambres et bureaux, la salle de bain et les couloirs, nous allons voir que la démarche SlowHeat peut très bien s'y appliquer.

Chambres et bureaux

La chambre et le bureau - dans le cas de télétravail - sont des endroits où nous sommes amenés à rester 8 heures d'affilées sans pouvoir s'activer.

Pour la chambre, la première solution réside toujours dans l'isolation du corps, avec une couverture de saison. Sur le marché celles-ci sont classées de "léger" à "très chaud". Le choix dépend de la morphologie et de la température de la chambre. Si cette solution non-énergétique n'est pas suffisante, il est possible d'utiliser un chauffage de proximité directement au contact du corps comme la traditionnelle bouillotte ou un sur-matelas chauffant d'une puissance de moins de 100 Watts. Il existe également des solutions de chauffage de proximité rayonnant de moyenne énergie qui peuvent améliorer le confort à la sortie du lit, lors de l'habillement. Cela consiste en un radiant de moins de 1000 Watts.

Pour ce qui est du bureau des pratiques non-énergétiques existent également. Sachant qu'un travailleur et son PC représente une source de chaleur de 150 Watts [12], il peut être intéressant de mutualiser un bureau pour plusieurs télétravailleurs. Il existe également des technologies de chauffage périphériques directement au contact du corps comme le tapis de bureau chauffant ou la cape chauffante. Enfin on a aussi des solutions rayonnantes de moyenne énergie comparables à celle utilisée en sortie du lit mais de plus petite taille et de plus petite puissance.

Salle de bain

La salle de bain est une pièce très particulière. L'activité principale qui s'y déroule est la douche. Elle n'a lieu que quelques fois par semaine et ne dure en général pas plus de 15 minutes. On sort nus et mouillés d'un endroit chaud et humide ce qui accentue la sensation de froid.

Une première solution est non-énergétique, sans aucun chauffage de proximité. Il s'agit d'enfiler un peignoir directement en sortie de douche. Dans ce cas il est tout de même nécessaire d'accepter à un certain moment de ressentir le froid en sortie de douche. Ensuite vient la solution du chauffage à moyenne énergie. Il s'agit d'une plaque radiante de quelques centaines de Watts qui va servir de chauffage de proximité. Elle aura la fonction de chauffer uniquement le corps dans la zone où la personne se sèche.

Couloirs

Les couloirs sont des espaces de passage où l'on ne fait que transiter. Étant donné qu'ils sont principalement utilisés pour se déplacer, il n'apparaît pas essentiel de mettre en place des solutions pour améliorer le confort thermique dans ces zones.

4.2 Analyse des pratiques socio-techniques des différents systèmes de chauffage

Dans le chapitre précédent, nous avons évalué l'impact environnemental du chauffage au poêle de masse et l'avons comparé à d'autres systèmes. Cette comparaison se fondait sur l'impact par rapport à une quantité d'énergie fournie. Elle supposait que tous les systèmes de chauffage seraient sollicités de manière égale. Cependant, cela ne reflète pas la réalité. Dans cette section, nous allons examiner comment les différents systèmes de chauffage sont réellement utilisés afin de nuancer les résultats obtenus précédemment. Pour rédiger cette section, nous avons recueilli des témoignages au moyen d'un questionnaire qualitatif^[1] sur l'usage du poêle de masse. Nous avons également effectué une revue de la littérature.

4.2.1 Spécificités logistiques

Les spécificités logistiques font référence à l'interaction de l'utilisateur avec le système.

Chaudière à gaz et pompe à chaleur

Ces deux systèmes modernes sont contrôlés par un thermostat, qui sert de cerveau à l'installation. Il ajuste tous les paramètres pour maintenir une température ambiante souhaitée par l'utilisateur. Cette température est la seule consigne que l'utilisateur doit fournir au thermostat. Dans cette configuration, l'utilisateur joue un rôle limité dans le fonctionnement de son système de chauffage, dont la mise en marche nécessite très peu d'effort. Bien que cela puisse être avantageux en termes de logistique et de gain de temps, cela rend l'utilisateur moins conscient de sa consommation énergétique. En effet, lorsqu'il règle son thermostat à une certaine température, il lui est difficile d'évaluer la quantité d'énergie nécessaire pour atteindre cet objectif. De plus, ces systèmes fonctionnent de manière discrète et silencieuse, ce qui peut amener à les laisser allumés par inadvertance.

Poêle traditionnel

L'utilisation d'un poêle traditionnel est bien plus contraignante que celle des deux systèmes modernes que nous venons d'évoquer. Tout d'abord, l'approvisionnement en combustible requiert un effort pour organiser le stockage. Ce stockage doit répondre à plusieurs exigences : être surélevé par rapport au sol, dans un endroit ventilé et couvert. Concernant l'utilisation de l'appareil, l'allumage nécessite

1. Ce questionnaire est disponible en annexe ^[B]

une préparation préalable du foyer. Une surveillance régulière est nécessaire pour maintenir la combustion, ce qui implique d'ajouter fréquemment du combustible. Bien que cette tâche puisse être ardue, cela permet à l'utilisateur de visualiser sa consommation énergétique. La régulation de la puissance se fait manuellement, en ajustant la quantité de combustible et le réglage de l'apport d'air dans le foyer.

Poêle de masse

Pour ce qui est du poêle de masse, les contraintes liées aux spécificités d'utilisation sont certes plus importantes que pour une chaudière à gaz ou une pompe à chaleur, mais sont moindres que pour un poêle traditionnel. Les contraintes de stockage du combustible sont les mêmes que pour un poêle traditionnel, de même que la préparation du foyer et l'allumage du combustible. Cependant, pour le poêle de masse, la puissance est régulée par l'accumulateur qui stocke la chaleur et la restitue progressivement. Ainsi, une fois la combustion lancée, il n'est plus nécessaire d'intervenir sur le foyer et il convient de garder la porte fermée. L'utilisateur doit simplement préparer son foyer avec la quantité de bois nécessaire et y lancer la combustion. Sa seule intervention sera de refermer le clapet de d'arrivée d'air à la fin de la combustion² (une fois que les flammes ne sont plus visibles).

4.2.2 Spécificités opérationnelles

Les spécificités opérationnelles désignent l'ensemble des caractéristiques techniques et fonctionnelles d'un système de chauffage qui influencent son efficacité. Cela inclut la manière dont le système distribue la chaleur et régule sa puissance.

Chaudière à gaz et pompe à chaleur

Ces deux systèmes de chauffage moderne sont généralement accompagnés d'un circuit de chauffage par le sol ou de radiateurs présentant une surface d'échange importante avec l'environnement. Ces systèmes de distribution peuvent ainsi fonctionner à une température plus basse. Le réseau de distribution de chaleur associé aux chaudières à gaz et aux PAC s'étend dans la plupart des pièces de la maison, offrant ainsi un accès direct à la chaleur dans chacune d'entre elles.

Poêle traditionnel

Les poêles traditionnels, lorsqu'ils fonctionnent à plein régime, dégagent une puissance très importante, mais sur une durée relativement courte. En effet, ces

2. Cela peut être automatisé si le poêle dispose de la technologie du régulateur automatique du clapet d'arrivée d'air [3.7.3](#) est installée.

poêles ne possèdent aucun habillage capable de stocker la chaleur, ce qui signifie qu'ils ne peuvent pas la restituer lentement sur une période prolongée. La chaleur est libérée presque uniquement pendant la combustion. En conséquence, les parois des poêles traditionnels atteignent des températures plus élevées, ce qui les classe parmi les systèmes de chauffage à haute température. Afin de limiter ce pic de puissance relativement court, les pratiques visent à ralentir la combustion du bois en limitant l'arrivée d'air. Cela permet d'atténuer le pic tout en prolongeant la durée de diffusion de la chaleur du poêle. Contrairement à la chaudière à gaz et à la PAC ce système de chauffage ne possède pas de système de distribution qui permet d'acheminer la chaleur vers des pièces périphériques. Le projet SlowHeat détaillé en [4.1.4](#), offre une réponse intéressante à cette problématique.

Poêle de masse

Pour le poêle de masse il n'y a pas de raison de ralentir le processus de combustion car celui-ci n'influence pas sa courbe de chauffe qui dépend de l'accumulateur de l'installation. La combustion se déroule donc à plein régime. Le poêle de masse émet une puissance moindre que le poêle traditionnel mais est capable de maintenir une certaine puissance pendant une longue période. Il s'agit d'un système de chauffage basse température. Comme expliqué en [4.1.3](#), et tout comme le poêle traditionnel, on est confronté à la problématique des pièces périphériques sur lesquelles l'effet du poêle est limité.

4.2.3 Spécificité d'usage du combustible

Pour le poêle traditionnel et le poêle de masse, le bois est le combustible utilisé. Comme expliqué dans le chapitre précédent, cette source d'énergie est considérée comme renouvelable car le CO₂ émis lors de la combustion est dit biogénique. Cependant, bien que le bois soit une ressource renouvelable, il est essentiel de l'exploiter de manière judicieuse pour en maximiser l'effet utile.

Poêle traditionnel

Comme expliqué dans les spécificités opérationnelles du poêle traditionnel, une fois la combustion terminée, le poêle ne fournit rapidement plus de chaleur. Pour éviter la contrainte de recharges fréquentes, il est donc préférable d'utiliser un combustible qui brûle aussi longtemps que possible. Ce type de poêle nécessite donc des essences de type feuillus durs.

Poêle de masse

Contrairement au poêle traditionnel, où la restitution de chaleur dépend de la durée de combustion, celle-ci est régulée par l'accumulateur dans le cas d'un poêle de masse. Cela permet l'utilisation de bois de type feuillus tendres, dont la combustion se déroule rapidement et à haute température. Cependant, l'ADEME indique [56] que les résineux sont à éviter pour le chauffage domestique en raison de fortes émissions de goudrons lors de leur combustion, ce qui entraîne un encrassement rapide des carneaux. Pour évaluer si l'utilisation de diverses essences de bois comme combustible est réellement mise en pratique dans le cas des poêles de masse, nous avons interrogé plusieurs utilisateurs. Le questionnaire mentionné au début de cette section comprend une question sur le type de combustible utilisé. Nous avons recueilli onze témoignages, et les résultats de cette question sont présentés dans le tableau 4.1. Étant donné le caractère exploratoire de cette enquête,

Essence	Proportion d'utilisateurs
Feuillus durs	64 %
Feuillus tendres	45 %
Résineux	27 %
Récupération	36 %

TABLE 4.1 – Distribution des Essences de Bois Utilisées dans les Poêles de Masse

aucune analyse quantitative détaillée ne sera réalisée. Cependant, nous résumons ici les résultats principaux. Les résultats montrent que, malgré la possibilité d'utiliser du feuillu tendre, la majorité des utilisateurs préfèrent le feuillu dur. De plus, une proportion notable de personnes utilisent du résineux, malgré les avertissements concernant son utilisation. Enfin, plus d'un tiers des utilisateurs exploitent du bois de récupération.

4.2.4 Conséquences des spécificités sur l'utilisation

Tout d'abord, comme le montre l'article [54], un système de chauffage basse température améliore non seulement le confort thermique mais permet également des économies d'énergie. Cela se confirme lorsqu'on compare la consommation en combustible d'un poêle traditionnel (haute température) et d'un poêle de masse (basse température). L'AFPMA décrit une réduction allant de 30 à 50 % [55] avec un poêle de masse. Pour pallier le phénomène de surchauffe des poêles traditionnels, les utilisateurs ont tendance à effectuer une combustion en sous-régime en limitant l'arrivée d'air au foyer.

Bien que la chaudière à gaz et la PAC soient des systèmes à basse température, leurs spécificités d'utilisation peuvent entraîner une sollicitation accrue.

Étant donné leur facilité de démarrage, un utilisateur peut être tenté de les allumer même lorsque cela n'est pas indispensable. En revanche, avec un poêle de masse ou un poêle traditionnel, l'effort nécessaire pour préparer le foyer peut amener l'utilisateur à reconsidérer sa décision et réaliser que cela n'est pas nécessaire. De plus, un poêle n'entraîne pas une consommation excessive en cas d'oubli : une fois le combustible épuisé, le foyer ne sera pas rechargé. En revanche, une chaudière à gaz ou une PAC, étant des systèmes silencieux et donc facilement oubliés, continueront de fonctionner pour maintenir la température réglée sur le thermostat. Enfin, comme le circuit de distribution de chaleur des chaudières à gaz et des PAC couvre la plupart des pièces, leur utilisation est généralement plus intensive. Compte tenu de tous ces éléments, le poêle de masse, grâce à ses spécificités, a tendance à être moins sollicité, ce qui favorise une utilisation plus raisonnable.

En ce qui concerne l'utilisation du combustible, le poêle de masse présente un avantage par rapport au poêle traditionnel, car il n'exige pas un type particulier de bois pour fonctionner. En effet, la seule contrainte est que le bois doit être sec et sain³. Contrairement au poêle traditionnel, qui nécessite généralement du feuillu dur, le poêle de masse peut également utiliser du feuillu tendre, souvent considéré comme inadapté au chauffage. Malgré les recommandations de ne pas utiliser de résineux, plus d'un quart des personnes que nous avons interrogées l'utilisent. Cela représente une proportion significative, ce qui implique que, bien qu'il ne soit pas idéal, l'usage de résineux est néanmoins possible. Cette flexibilité quant aux essences de bois réduit la pression sur un type d'arbre spécifique, évitant ainsi une surexploitation forestière. De plus, elle permet de valoriser les résidus des différentes industries du bois, composés de diverses essences. Cependant, on remarque que le type de bois le plus utilisé pour les poêles de masse reste le feuillu dur. Autrement dit, cette possibilité de se tourner vers d'autres essences de bois moins traditionnelles pour le chauffage, afin de réduire la pression sur les types d'arbres couramment exploités, n'est pas encore pleinement exploitée.

4.3 L'Association Française du Poêle Maçonné Artisanal : une communauté de pratique qui fait émerger la profession de poêlier

Début juin j'ai eu la chance de me rendre à Montendre, à proximité de Bordeaux, pour assister aux rencontres annuelles de l'AFPMA (Association Française du Poêle Maçonné Artisanal). Cela se déroulait sur 4 jours avec au programmes : des conférences, des tables rondes, des ateliers constructions et surtout beaucoup

3. Un bois sain est un bois qui n'a pas subi de traitement particulier.

d'échanges avec l'équipe et les adhérents à l'association.

Issue d'un regroupement de quelques artisans poêliers depuis 2008, l'association a été officiellement créée en 2013 et regroupe actuellement 150 adhérents, majoritairement artisans poêliers. Les profils de ces professionnels sont divers : certains travaillent comme indépendants, tandis que d'autres ont créé leur propre entreprise et embauché des ouvriers pour les assister.

Je me suis rendu sur place initialement pour aborder des questions techniques sur le poêle de masse, ce qui a effectivement eu lieu et m'a beaucoup apporté à ce niveau. J'en suis également reparti avec une compréhension approfondie de ce qu'implique le métier de poêlier, qui au-delà de la simple installation d'un système de chauffage chez un client. Mais j'ai surtout réalisé au cours de ces quelques jours, le rôle crucial que joue l'association dans le développement de la profession. En effet, celle-ci forme une communauté de pratique qui fait évoluer grandement le métier de poêlier.

4.3.1 Communauté de pratique : définition

Une communauté de pratique (CP) est un groupe informel, autonome et spontané de personnes partageant un métier, des pratiques ou un domaine de savoir commun [14, 15]. Ces groupes favorisent l'apprentissage individuel et collectif grâce aux interactions entre leurs membres, intégrant ainsi les dimensions sociales et identitaires dans le processus d'apprentissage, au-delà des simples processus mentaux individuels [14]. Selon Wenger [15], les CP se caractérisent par trois éléments essentiels :

1. **Leur domaine de savoir** : C'est l'élément structurant qui unit les membres autour d'un objectif commun. Les membres définissent les problèmes et les aspects pertinents à considérer, ce qui leur permet de construire une compréhension partagée de leur situation.
2. **Leur fonctionnement** : Les CP reposent sur des relations d'engagement mutuel entre les membres. Ce ne sont pas simplement les titres ou les tâches qui lient les membres, mais une passion commune et des interactions régulières qui renforcent leur capacité à accomplir leur travail.
3. **Leur capacité à produire la pratique** : Les CP disposent d'un référentiel commun de ressources, comprenant des routines, des leçons, des artefacts et des savoirs accumulés. L'appartenance à une CP signifie maîtriser ce référentiel, qui sert de base pour gérer de nouvelles situations et créer de nouveaux savoirs.

4.3.2 Entretiens avec des experts-praticiens de la communauté de pratique

Lors des quatre jours de rencontres organisées par l'AFPMA, une soixantaine de personnes étaient présentes. Bien que j'aie échangé avec la plupart d'entre elles, je n'ai pas pu engager de longues discussions avec chacune. Certaines rencontres ont particulièrement retenu mon attention et ont été particulièrement enrichissantes. Ces échanges m'ont grandement aidé dans la rédaction de cette section et, plus largement, dans l'ensemble de mon travail. Il m'a semblé pertinent de dresser la liste de ces personnes, accompagnée d'une brève description de leur parcours. Pour des raisons de confidentialité, ces individus porteront des noms d'emprunt.

Benjamin a créé son entreprise de construction et de rénovation écologique en Belgique en 2015, inspiré par la rénovation de sa maison en 2010. Son activité est assez diversifiée : ossatures bois, isolations écologiques, aménagements extérieurs, enduits naturels, et bien sûr, installations de poêles. Au départ, Benjamin s'est lancé dans la construction de poêles de masse sans expérience ni formation. Cela a fonctionné pendant un certain temps, jusqu'à ce qu'il rencontre des problèmes avec un poêle qui ne fonctionnait pas correctement. C'est alors qu'il a compris l'importance de se former au métier de poêlier et a rejoint l'AFPMA. C'est Benjamin qui m'a mis en contact avec l'AFPMA. Je me suis d'abord rendu chez lui pour discuter et visiter le chantier d'un poêle. C'est à ce moment-là qu'il m'a parlé de l'association et des rencontres annuelles qui avaient lieu.

Pierre est belge et maintenant installé en Alsace. Il a rencontré et accompagné Philippe en 2010, qui avait développé son propre concept de poêle de masse sur mesure. En 2011, il rejoint l'AFPMA et entame également un parcours de formation où il obtient un certificat d'aptitude pédagogique (CAP) de ramoneur fumiste. Il se forme ensuite aux techniques de construction de poêle de masse autrichiennes en 2011 et crée sa société à la fin de cette formation. Il a depuis installé plus de 130 poêles maçonnés. Il a développé sa propre feuille de calcul qui lui permet de dimensionner des poêles de masse, sans avoir besoin d'utiliser de logiciel. Il possède donc une connaissance approfondie des problèmes physiques (aérauliques et thermiques) auxquels on est confronté dans le cadre de la conception d'un poêle de masse. Nous avons longuement discuté de ces sujets techniques. Tout en ayant cette discussion j'ai eu la chance de pouvoir participer à la construction d'un poêle de masse avec lui et un autre adhérent à l'association.

Michael est poêlier dans le département de la Charente-Maritime. En parallèle de sa profession, il est un membre très actif de l'AFPMA. Il est le technicien du laboratoire de l'association, dont nous parlerons plus en détail ultérieurement. Michael possède un solide bagage technique. Grâce à cela il a pu développer un laboratoire de haute qualité pour l'association. Michael a organisé pendant le deuxième jour des rencontres une visite du laboratoire. J'ai pu tirer parti de sa grande maîtrise

des différents outils de son laboratoire pour lui poser toutes mes questions. Nous avons également eu une discussion sur les polluants atmosphériques émis par la combustion du bois.

Jacques, lassé de son précédent emploi, a décidé de se lancer dans la construction de poêles, où il a découvert le poêle de masse. Ce domaine est rapidement devenu une passion pour lui, dépassant largement le cadre d'un simple métier. Cependant, trop absorbé par son travail, il a fini par saturer et s'est complètement détourné de la profession, en étant dégoûté. Les rencontres de 2024 ont marqué son retour dans le domaine. Désormais, il souhaite se relancer tout en évitant les erreurs du passé, notamment celle de se laisser submerger par ses responsabilités professionnelles. J'ai eu l'occasion de discuter avec Jacques de la lourde charge que représente le métier de poêlier et des risques que ce travail envahisse la vie personnelle, perturbant ainsi l'équilibre entre vie professionnelle et vie privée.

Dimitri possède une formation d'ingénieur mais également en sociologie. Bien que je n'aie pas eu l'occasion de discuter avec lui pendant les quatre jours passés à Montendre, nous nous sommes retrouvés par hasard dans le train du retour. Lors de cette discussion, il m'a ouvert des pistes de réflexion qui ont permis de mener à ce qui va être présenté dans cette section.

Interlocuteur	Date	Durée	Profil
Benjamin	15/05/24	1h	Entrepreneur belge
Pierre	06/06/24	3h	Poêlier belge installé en Alsace
Michael	07/06/24	1h	Poêlier et responsable du labo de l'AFPMA
Jacques	08/06/24	1h	Ancien poêlier qui reprend du service
Dimitri	9/06/24	1h	Aspirant poêlier, avec formation d'ingénieur et de sociologue

TABLE 4.2 – Récapitulatif des échanges avec les experts-praticiens de la communauté

4.3.3 Différents soutiens de l'AFPMA envers la profession

Comme mentionné précédemment, l'AFPMA joue un rôle crucial dans l'émergence et l'évolution du métier de poêlier. Nous allons maintenant détailler les actions et initiatives que l'association entreprend pour y parvenir.

Gestion financière et organisationnelle

L'AFPMA organise des moments d'échange entre ses membres pour partager des conseils sur la gestion de leur activité de poêlier. Cela inclut des discussions sur la planification financière, la gestion des bilans, et l'amortissement du matériel.

En outre, des aspects organisationnels sont abordés, et deux points ont particulièrement retenu mon attention. D'abord, le métier de poêlier est à la fois éprouvant et exigeant, nécessitant une expertise approfondie dans diverses pratiques artisanales. Grâce à cette polyvalence, les poêliers peuvent diversifier leurs activités. En alternant avec d'autres types de réalisations, ils peuvent alléger leur charge de travail tout en continuant à exploiter leurs compétences et à générer des revenus.

Ensuite, pour de nombreux poêliers, le choix de cette profession découle d'une véritable passion pour le poêle de masse, ce qui peut compliquer la distinction entre passion et travail. Cependant, il est essentiel de se déconnecter régulièrement pour maintenir un équilibre sain entre vie professionnelle et personnelle. Lors des rencontres, j'ai constaté que les poêliers partagent souvent leurs stratégies et astuces pour atteindre cet équilibre.

Obtention de la garantie décennale

Comme pour de nombreux travaux liés à la construction, il est obligatoire pour un poêlier d'être couvert par une garantie décennale. Il s'agit d'une assurance qui couvre, pendant dix ans à compter de la réception des travaux, les dommages qui compromettent son utilisation ou la solidité de l'ouvrage. En cas de sinistre, les assureurs vérifient que l'artisan a bien suivi les normes de construction propre au corps de métier, définies dans les Documents Techniques Unifiés (DTU), avant d'accepter d'intervenir dans le cadre de la garantie décennale. Le problème est qu'il n'existe pas de DTU spécifique pour le poêle de masse. Cela complique l'obtention de la garantie décennale pour un poêlier car cette absence rend les assureurs réticents. Dans ce cas, les assureurs demandent souvent des preuves de chantiers précédents pour attester de la qualité du travail de l'artisan. Cependant, ces travaux doivent alors être réalisés sans assurance, ce qui représente un risque financier considérable. Pour réaliser ces chantiers de référence, la démarche d'auto-construction ou des interventions chez des clients prêts à accepter de ne pas être couverts sont pratiquées.

En vue de répondre à cette problématique, l'AFPMA travaille en collaboration avec l'Agence Qualité Construction (AQC)⁴ pour rédiger un texte reprenant

4. L'AQC est une association française dédiée à l'amélioration de la qualité des constructions et à la réduction des désordres dans les bâtiments. Elle collabore avec les assurances pour identifier les causes des sinistres, proposer des solutions préventives, et diffuser des bonnes pratiques afin

les bonnes pratiques à suivre dans la construction des poêles de masse. Ce texte permettra de structurer la conception et la construction des poêles de masse et fournira un cadre de référence technique, en l'absence de DTU spécifique. Parallèlement à ce texte, l'association envisage de créer un tampon reconnaissant que le poêlier est apte à exercer la profession car il maîtrise les bonnes pratiques inscrites dans ce document. Afin d'obtenir cette reconnaissance les poêliers seraient amenés à devoir suivre la formation technique proposée par l'AFPMA, sur laquelle nous aurons l'occasion de revenir plus tard. Grâce à toutes ces choses mises en place l'accès à une garantie décennale sera bien plus aisée pour les artisans poêliers.

Malgré l'absence de DTU pour le poêle de masse, il existe tout de même une norme dont je n'ai cessé d'entendre parler durant mon séjour. Il s'agit de la norme NF EN 15544. Elle est issue de travaux de l'institut technologique de Vienne en Autriche et garantit les performances en termes de tirage, de pollution atmosphériques et rendement concernant les poêles de masse artisanaux. Les détails techniques de celle-ci sont disponibles en annexe ???. L'AFPMA a joué un rôle crucial dans la reconnaissance de cette norme autrichienne par les instances officielles du pays. En effet grâce au lobbying mené par l'association, la norme NF EN 15544 a été reconnue et inscrite dans le Code des impôts français. Cela permet aux poêles de masse conformes à cette norme de bénéficier de crédits d'impôt, rendant l'installation plus économique et attractive pour le client.

Formation dimensionnement

Plus tôt, nous avons brièvement abordé les formations techniques proposées par l'AFPMA à ses adhérents. En effet, l'association organise deux fois par an une formation de cinq jours sur le dimensionnement du poêle de masse artisanal, conformément à la norme NF EN 15544. Ce module a plusieurs objectifs : il enseigne d'abord les principes physiques fondamentaux du poêle de masse, puis forme à l'estimation de la puissance requise pour un chantier. Il couvre également l'utilisation d'un logiciel de calcul, ainsi que l'interprétation et l'ajustement des résultats obtenus au moyen de celui-ci. L'outil de calcul utilisé est le logiciel Basic2+ qui a été développé par la cousine de l'AFPMA, l'Association Autrichienne du Poêle de Masse. Ce logiciel permet de créer une feuille de calcul qui illustre le fonctionnement du poêle en indiquant notamment les températures, les vitesses et les pertes de charges à différents endroits dans les carreaux du poêle. La présence de cette feuille de calcul est une condition essentielle pour que le poêle respecte la norme NF EN 15544.

de réduire les risques de sinistre.

Développement d'une méthode de calcul étendue

Le logiciel Basic2+ étant développé par l'Association Autrichienne du Poêle de Masse, il est spécialisé pour les poêles qu'ils ont l'habitude de construire. Les artisans autrichiens ont tendance à suivre une philosophie de construction dans laquelle les poêles sont souvent similaires, reposant sur des modèles standards qu'ils maîtrisent parfaitement. Cette uniformité permet au logiciel de produire des résultats très satisfaisants pour ces types de poêles.

En revanche, en France, la philosophie de conception des poêles artisanaux diffère de celle des autrichiens. Les artisans français valorisent une grande liberté dans le dimensionnement des poêles, permettant une personnalisation sur mesure pour chaque projet. Cette flexibilité vise à répondre précisément aux besoins spécifiques des clients et aux caractéristiques uniques de chaque demande. Ainsi, pour certains types constructifs particuliers que les artisans français pratiquent, ce logiciel ne produit pas de résultats satisfaisants.

Cela souligne la nécessité de méthodes de calcul plus adaptatives qui puissent mieux s'aligner avec la philosophie française de conception sur mesure des poêles artisanaux. C'est un des objectifs que l'AFPMA s'est fixé avec son projet de méthode de calcul étendue (MCE). L'objectif est, grâce à une adaptation du modèle autrichien, de calibrer et valider une nouvelle méthode de calcul permettant de prédire le comportement de poêles avec un large panel de types constructifs.

Laboratoire de recherche

L'AFPMA possède également son propre laboratoire de recherche que j'ai eu la chance de visiter. La particularité remarquable de ce labo est qu'il est reconnu par le Comité Français d'Accréditation  (COFRAC). Cela signifie qu'il a été évalué et reconnu pour sa compétence technique et son impartialité. Cette accréditation se base sur des normes européennes et atteste que les laboratoires peuvent effectuer des tests et des étalonnages de manière conforme aux exigences de qualité et de sécurité.

Le laboratoire de l'AFPMA est équipé d'un poêle de masse spécialement conçu pour permettre des mesures exhaustives de ses performances. Tous les aspects critiques de son fonctionnement sont mesurables : le débit d'arrivée d'air, les températures de fumées et, la pression dans les carneaux,... De plus, les fumées émises peuvent être analysées dans le but d'évaluer les émissions de polluants atmosphériques.

Ces infrastructures sont utiles pour l'AFPMA elle-même car des tests y sont faits dans le but de calibrer la méthode de calcul étendue dont nous avons parlé plus haut. Cependant le laboratoire permet également de récolter des données utiles pour d'autres structures. Actuellement, l'ADEME sollicite les services du

labo de l'AFPMA pour effectuer des mesures sur polluants atmosphériques émis par les poêles de masse. Une description plus détaillée des objectifs et des moyens associés concernant le laboratoire de recherche est disponible en annexe [D](#).

4.3.4 Evaluation de l'AFPMA en tant que communauté de pratique

En se basant sur la définition de la communauté de pratique selon Wenger ([4.3.1](#)) et ses trois éléments qui la caractérise, nous allons évaluer la CP que forme l'AFPMA.

1. **Leur champ de compétence** : Il est clairement défini et se reflète explicitement dans le nom de l'association : le poêle maçonnerie artisanal. Ce terme correspond à celui de poêle de masse. L'évolution du métier de poêlier constitue l'élément central et l'objectif partagé qui les rassemble.
2. **Leur fonctionnement** : Comme toute association, l'AFPMA dispose d'un conseil d'administration avec des rôles définis. Lors des rencontres annuelles, des commissions sont créées pour travailler sur des thématiques spécifiques. Ces commissions sont censées interagir entre elles tout au long de l'année et présenter leurs travaux lors de la rencontre suivante. Cependant, ayant seulement assisté à la rencontre annuelle de 2024, je ne sais pas dans quelle mesure ces interactions entre les commissions se concrétisent réellement et si cette initiative contribue effectivement à augmenter la régularité des échanges au sein de la communauté. Par ailleurs, la plupart des activités organisées pendant ces rencontres ne sont pas le résultat d'obligations liées à un poste, mais plutôt d'initiatives spontanées. Les modules et conférences sont ainsi proposés par les membres de leur propre volonté. Bien qu'il y ait quelques événements d'échange organisés durant l'année, pour la majorité des membres, les seuls moments d'interaction se déroulent lors de ces rencontres annuelles, ce qui reste relativement peu fréquent.
3. **Leur capacité à mettre en pratique** : Comme mentionné précédemment, l'association propose une formation sur le dimensionnement des poêles de masse, où tous les concepts clés nécessaires à cette tâche sont enseignés. Cette formation comprend non seulement un travail théorique en salle, mais aussi une partie pratique en atelier, permettant d'illustrer les concepts étudiés. L'utilisation d'un logiciel fait également partie de l'enseignement. Cependant, je n'ai pas connaissance de la proportion des adhérents qui ont effectivement suivi cette formation. De plus, l'AFPMA travaille au développement d'un logiciel de calcul utilisant des méthodes avancées, afin de

disposer d'un outil adapté à leurs besoins, ce qui n'est pas toujours le cas avec le logiciel actuellement disponible.

4.3.5 Bilan de mon déplacement à Montendre

Mon déplacement à Montendre a été enrichissant à bien des égards, tant sur le plan technique que personnel. D'un point de vue technique, j'ai découvert à quel point la construction de poêles de masse s'appuie sur des techniques et des connaissances approfondies. Avant cette rencontre, je pensais que la construction de ces poêles se faisait de façon empirique. J'ai pris conscience que leur conception repose en réalité sur un savoir-faire rigoureux qui mérite d'être reconnu et crédibilisé.

D'un point de vue pratique, j'ai eu l'occasion de rencontrer des gens passionnés et ouverts au partage. Ces échanges ont été particulièrement enrichissants, me permettant de comprendre les enjeux liés au développement de ce système de chauffage. J'ai également pu saisir les défis auxquels font face les professionnels du métier.

Ce déplacement m'a également apporté une dimension pratique que je n'avais pas anticipée. Jamais je n'aurais pensé me retrouver à maçonner un poêle dans le cadre de ce travail. Je suis ravi d'avoir eu l'opportunité de vivre cette expérience, qui a non seulement enrichi ma recherche mais a également renforcé ma conviction de la pertinence et du potentiel des poêles de masse dans le paysage des systèmes de chauffage.

Conclusion

Concernant la sélection de matériaux réalisées dans le chapitre 2, bien que neuf matériaux aient montré des propriétés adaptées pour remplir la fonction d'accumulateur de chaleur dans un poêle de masse, la majorité d'entre eux perdent leur pertinence lorsqu'on prend en compte les deux critères de sélection choisis pour cette étude : le coût financier et les émissions de gaz à effet de serre. Parmi ces matériaux, seuls le béton, la pierre et la brique en argile cuite se distinguent sur la base du compromis prix/coût CO₂. Le classement final les place très proches les uns des autres, mais si un choix devait être fait, le béton se classe en première position, suivi de la pierre, puis de la brique. Ces résultats sont d'autant plus pertinents qu'ils correspondent aux matériaux que l'on observe couramment sur les poêles de masse en pratique.

L'évaluation de l'impact environnemental du chauffage au moyen d'un poêle de masse réalisée dans le chapitre 3, révèle un potentiel de réchauffement global chiffré à 34,4 gCO₂.eq par kWh fourni. Cet impact est réparti plus ou moins équitablement entre le cycle de vie de l'infrastructure du poêle et celui du bois utilisé comme combustible. En comparaison avec d'autres systèmes de chauffage, une pompe à chaleur émet 2,3 fois plus de gaz à effet de serre, tandis qu'une chaudière à gaz en émet 7,4 fois plus. Concernant la pollution atmosphérique, les émissions liées à la pompe à chaleur et à la chaudière à gaz sont d'un ordre de grandeur inférieur à celles du poêle de masse, rendant leur impact négligeable par rapport à celui-ci. Pour le poêle traditionnel, les émissions de gaz à effet de serre sont réduites de 21 % par rapport à celles du poêle de masse. Étant donné que le foyer utilisé pour le poêle traditionnel est similaire à celui du poêle de masse, les émissions de polluants atmosphériques devraient théoriquement être les mêmes. Cependant, en pratique, la combustion dans les foyers de poêles traditionnels ne se fait pas à régime nominal, mais plutôt à une allure réduite. Cela entraîne une baisse du rendement de l'installation et une augmentation des émissions de polluants atmosphériques, ce qui conduit à une hausse de l'impact sur le potentiel de réchauffement global et à une aggravation de la pollution de l'air.

Le chapitre 4 aborde les aspects socio-techniques autour du poêle de masse. Ce type de poêle fournit de la chaleur par convection et rayonnement à basse température, un mode de diffusion qui améliore le confort thermique par rapport aux systèmes de chauffage à haute température. Cependant, l'impact du poêle de masse reste limité dans les pièces périphériques, c'est-à-dire celles éloignées du poêle. Pour remédier à cette problématique, la démarche SlowHeat propose de repenser la manière de se chauffer en redéfinissant l'objectif du système de chauffage pour qu'il chauffe directement les corps. Ensuite, nous avons examiné les spécificités du poêle de masse par rapport à d'autres systèmes de chauffage. Contrairement au poêle traditionnel, souvent trop puissant pour fonctionner à plein régime, la combustion dans le poêle de masse se fait à vitesse nominale. De plus, le poêle de masse est généralement moins sollicité dans la pratique qu'une chaudière à gaz ou une pompe à chaleur. Enfin, nous avons abordé le rôle de l'Association du Poêle Maçonné Artisanal Français. Celle-ci apporte un soutien logistique et technique qui contribue à la professionnalisation des poêliers et à la reconnaissance de leur profession ainsi que du système de chauffage qu'elle propose.

Il est clair que les chapitres 2 et 3 sont orientés vers les sciences de l'ingénieur, tandis que le chapitre 4 se concentre davantage sur des pratiques socio-techniques, s'éloignant ainsi de la stricte pratique scientifique. Cependant, ces deux démarches se sont mutuellement enrichies. Un exemple concret de cela est la nuance apportée aux résultats obtenus pour l'impact environnemental du poêle traditionnel. L'analyse des pratiques d'utilisation a révélé qu'ils fonctionnent souvent en sous-régime, ce qui détériore les résultats initiaux concernant leur impact environnemental. Par ailleurs, la démarche scientifique a également contribué à l'analyse socio-technique. En effet, le questionnaire soumis aux différents utilisateurs de poêles de masse, initialement conçu pour réaliser une analyse de cycle de vie (ACV), a également permis de recueillir des informations sur les pratiques d'utilisation des poêles de masse, enrichissant ainsi l'analyse socio-technique.

Lors de mon séjour à Montendre au sein de l'Association Française de Poêle Artisanal Maçonné, j'ai été agréablement surpris par l'intérêt que mon travail de fin d'études a suscité. Parmi les réactions reçues, Yasin Gach, le fondateur de la société Uzume qui fabrique le poêle étudié dans le chapitre 3, s'est montré particulièrement enthousiaste. Il a d'ailleurs exprimé le souhait de recevoir la version finale de ce travail une fois terminée. Cela souligne l'importance et la pertinence de cette étude pour les professionnels du secteur.

Bien que ce travail ait permis d'apporter des réponses sur les sujets abordés, il est important de lui reconnaître certaines limites. Pour le chapitre 2, le coût des

matériaux a été évalué uniquement en tant que matières premières, sans prendre en compte les coûts liés à l'installation du poêle. Or, ces coûts peuvent varier considérablement d'un matériau à l'autre en fonction du temps de travail nécessaire, ce qui pourrait influencer les résultats obtenus. Concernant le chapitre 3, et plus précisément l'analyse du cycle de vie de l'infrastructure du poêle, celle-ci s'appuie sur les déclarations environnementales par défaut (DED) des différents constituants. Les impacts ont été majorés pour couvrir l'incertitude ce qui signifie que ces résultats ne reflètent pas précisément la situation rencontrée pour chaque composant du poêle.

Pour les recherches futures, plusieurs pistes peuvent être explorées pour approfondir les conclusions de ce travail. Concernant la sélection de matériaux, la base de données de niveau 1 du logiciel Granta Edupack est très générale. Par exemple, lorsqu'il est question de pierre, la distinction entre les différents types de pierre n'est pas faite. Il pourrait être intéressant d'affiner cette sélection en distinguant les différents matériaux au sein d'une même catégorie. Ensuite, dans le chapitre 3, il est expliqué que dans un foyer lorsque la combustion se déroule à allure réduite, le rendement diminue et les émissions de polluants atmosphériques augmentent. Il serait pertinent de quantifier précisément ces deux effets. Cela permettrait de montrer à quel point le poêle traditionnel, qui a tendance à être utilisé au ralenti, est moins performant en termes d'impacts sur l'environnement que le poêle de masse. Enfin, une perspective intéressante pour le chapitre 4 serait d'élargir l'ACV réalisée dans ce travail en une analyse sociale du cycle de vie (ACV sociale), qui complète l'ACV en évaluant les impacts réels et potentiels sur les aspects sociaux et sociétaux. Cette analyse pourrait être appliquée aux différents systèmes de chauffage et permettre une comparaison non seulement sur leur impact environnemental, mais aussi sur leurs effets sur les employés, les communautés locales, les consommateurs, la société, et d'autres groupes comme les enfants.

Annexe A

Script Python pour le champ de température dans l'accumulateur

Ce code permet de fournir la valeur de la température à n'importe quel instant durant la phase de stockage et la phase de restitution, à 4 points équidistants dans l'accumulateur : $x = 0, L/3, 2L/3$, et L . Le code est applicable pour n'importe quel matériau. Les seuls paramètres à configurer sont :

- t_{stock} : le moment où l'on souhaite connaître le champ de température durant la phase de stockage.
- t_{res} : le moment où l'on souhaite connaître le champ de température durant la phase de restitution.
- k : la conductivité thermique du matériau désiré.
- c : la chaleur spécifique du matériau désiré.
- ρ : la densité du matériau désiré.
- L : l'épaisseur de matériau désirée.

Listing A.1 – Simulation de la diffusion thermique

```
import sympy as sp
import numpy as np
from scipy.optimize import root_scalar
from numpy.polynomial.polynomial import Polynomial

# Paramètres de l'interface utilisateur
k = 2.2
rho = 2400
c = 1040
L = 0.1
t_stock = 2 * 3600
```

```

t_res = 10 * 3600

# Constantes
h = 10.348
T_0 = 288.15
q_w = 13.42 * 10**6 * 18 * 0.9 / (8 * 2 * 3600)
longueur = 4
alpha = k / (rho * c)

# Paramètres de simulation
x_table = np.linspace(0, L, longueur)
q = x_table
z = 4

# Fonction pour trouver les racines de l'équation caractéristique
def fun(x):
    return np.tan(x * L) - h / (k * x)

# Fonction pour trouver les racines en utilisant la méthode de Brent
def find_roots(L, k, h, num_roots=40):
    racines = []
    epsilon = 1e-6

    # Trouver la racine pour n = 0
    borne_inferieure = epsilon
    borne_superieure = np.pi / (2 * L) - epsilon
    try:
        res = root_scalar(fun, bracket=(borne_inferieure, borne_superieure), method='brentq')
        if res.converged:
            racines.append(res.root)
    except ValueError as e:
        print(f"Echec de la recherche de la racine pour n=0: {e}")

    # Trouver les racines pour n > 0
    for n in range(1, num_roots + 1):
        borne_inferieure = (n - 0.5) * np.pi / L + epsilon
        borne_superieure = (n + 0.5) * np.pi / L - epsilon
        try:
            res = root_scalar(fun, bracket=(borne_inferieure, borne_superieure), method='brentq')
            if res.converged:
                racines.append(res.root)
        except ValueError:
            pass

```

```

        , borne_supérieure), method='brentq')
    if res.converged:
        racines.append(res.root)
    except ValueError as e:
        print(f"Echec de la recherche de la racine pour
              n={n}: {e}")
    return np.array(racines)

# Trouver les racines
b = find_roots(L, k, h, num_roots=z)

# Solution statique
stat = -q_w * q / k + q_w / h + q_w * L / k

# Composante transitoire
trans = 0
for n in range(len(b)):
    num = q_w * (h * np.cos(b[n] * L) - h - k * b[n] * np.
                sin(b[n] * L)) / (h * k * b[n]**2)
    den = (2 * b[n] * L + np.sin(2 * L * b[n])) / (4 * b[n])
    a_n = num / den
    trans += a_n * np.cos(b[n] * q) * np.exp(-alpha * b[n]
        )**2 * t_stock)

result_stock = trans + stat + T_0
print("Le résultat après " + str(t_stock) + " secondes de
      stockage est de " + str(result_stock))

# Points d'interpolation
x_points = x_table
y_points = result_stock - T_0
coefficients = np.polyfit(x_points, y_points, len(x_points)
    - 1)
p = Polynomial(coefficients[::-1])

# Recherche des valeurs propres pour la restitution
def fun(x):
    return np.tan(x * L) - h / (k * x)

epsilon = 1e-6
b_res = []

try:

```



```

    res = root_scalar(fun, bracket=[epsilon, np.pi / (2 * L)
    - epsilon], method='brentq')
    if res.converged:
        b_res.append(res.root)
except ValueError:
    pass

for m in range(1, z):
    borne_inferieure = (m - 0.5) * np.pi / L + epsilon
    borne_superieure = (m + 0.5) * np.pi / L - epsilon
    if fun(borne_inferieure) * fun(borne_superieure) > 0:
        continue
    try:
        res = root_scalar(fun, bracket=(borne_inferieure,
        borne_superieure), method='brentq')
        if res.converged:
            lam = res.root
            y = h / (k * lam)
            err = np.tan(L * lam) - y
            if np.isclose(err, 0, rtol=0, atol=1e-6):
                b_res.append(lam)
    except ValueError:
        pass

# Solution de restitution
x = sp.symbols('x')
p_expr = sum(c * x**i for i, c in enumerate(coefficients
[:: -1]))
u_m_values = []
for m in range(1, z):
    integrand = p(x) * sp.cos(b_res[m-1] * x)
    numerator = sp.integrate(integrand, (x, 0, L))
    denominator = sp.integrate(sp.cos(b_res[m-1] * x)**2, (x
    , 0, L))
    u_m = numerator / denominator
    u_m_values.append(u_m.evalf())

u_m_values = [float(u) for u in u_m_values]

trans_res = np.zeros_like(x_table)
for m in range(1, z):
    u_m = u_m_values[m-1]
    trans_res += u_m * np.cos(b_res[m-1] * x_table) * np.exp

```

```
        (-alpha * b_res[m-1]**2 * t_res)

result_res = trans_res + T_0
print("Le résultat après " + str(t_res) + " secondes de
      restitution est de " + str(result_res))
```

Annexe B

Questionnaire qualitatif sur l'usage du poêle de masse

Questionnaire : Origine et Usage du Poêle de Masse

Origine du poêle

1. Depuis quand utilisez-vous votre poêle de masse ?
Votre réponse : _____
2. Par qui le poêle a-t-il été construit ?
 - vous-même
 - un poêliste ou un autre professionnel
 - Autre : _____
3. De quelle origine sont issus les matériaux de votre poêle ?
 - kit complet reçu pour la construction (poêle Uzume par exemple)
 - matériaux achetés neufs un à un
 - récupération
 - achat seconde main
 - Autre : _____
4. Si vous avez reçu votre poêle en kit, de quel constructeur et de quel modèle s'agit-il ?
Votre réponse : _____

Usage du poêle

5. Quelles sont les usages de votre poêle de masse ?

- Chauffage domestique
 - Production d'eau chaude sanitaire
 - Taque de cuisson
 - Four
 - Autre : _____
6. **Quel est le rendement théorique de votre poêle ?**
Votre réponse : _____
7. **Si vous ne connaissez pas le rendement de votre poêle, donnez le volume de pièces chauffées par celui-ci (pièces ne contenant pas d'autres moyens de chauffage). Donnez également le PEB de votre maison si possible.**
Votre réponse : _____
8. **Si vous utilisez votre poêle pour la production d'eau chaude sanitaire, quelle est votre consommation (approximativement) hebdomadaire de celle-ci ? (douche = 12 L/min) (bac évier cuisine = 15 à 20 L)**
Votre réponse : _____
9. **En période d'utilisation de votre poêle de masse, pour les usages cités à la question précédente, votre poêle est-il suffisant pour remplir la tâche ? Si non, quel est le moyen de substitution et pour quelle proportion de l'usage (et si possible, quelle quantité d'énergie est consommée hebdomadairement par ce moyen de substitution) ?**
Votre réponse : _____
10. **À quelle période de l'année commencez-vous généralement à utiliser votre poêle de masse, et à quelle période arrêtez-vous de l'utiliser ?**
Votre réponse : _____
11. **Combien de flambée faites-vous par jour ? Quelle quantité de bois (en kg) brûlez-vous approximativement ? (1 bûche de 50cm = 2/2,5kg)**
Votre réponse : _____
12. **Quel type de bois brûlez-vous ? (bûches de chêne, bûches d'épicéa, chute de bois divers du jardin, etc.)**
Votre réponse : _____
13. **À quelle distance de votre domicile provient le bois que vous brûlez ? Comment est-il transporté jusque chez vous ?**
Votre réponse : _____

14. Que faites-vous de vos cendres ?
Votre réponse : _____
15. Avez-vous déjà effectué des réparations sur votre poêle ? Si oui, lesquelles et comment les avez-vous effectuées ?
Votre réponse : _____
16. Devez-vous effectuer des travaux de maintenance sur votre poêle ? Si oui, expliquez en quoi cela consiste.
Votre réponse : _____

Détails techniques du poêle

16. De quoi est fait le corps du poêle qui stocke la chaleur ? Il peut s'agir de plusieurs matériaux. Si vous les connaissez, quelle est la masse ou le volume des matériaux ? Si vous ne les connaissez pas, estimez-en le volume. Avez-vous une idée de la provenance des matériaux ? S'il s'agit de réutilisation ou d'achat de seconde main, précisez-le.
Votre réponse : _____
17. Intéressons-nous à la vitre du foyer. Avez-vous des informations sur le type de verre ? Quelle est son épaisseur et quelle est sa surface ? Concernant la structure sur laquelle elle repose, essayez de la décrire au mieux (matériaux + dimensions). Avez-vous une idée de la provenance des matériaux ? S'il s'agit de réutilisation ou d'achat de seconde main, précisez-le.
Votre réponse : _____
18. Intéressons-nous maintenant à la fumisterie interne au poêle. À l'intérieur du poêle, les fumées sont-elles directement en contact du corps du poêle ou passent-elles dans des conduites ? Si oui, de quel matériau sont-elles faites et quelles en sont les dimensions (diamètre + longueur). Avez-vous une idée de la provenance des matériaux ? S'il s'agit de réutilisation ou d'achat de seconde main, précisez-le.
Votre réponse : _____
19. Intéressons-nous maintenant à la fumisterie externe au poêle. Pouvez-vous décrire de quel matériau est faite la conduite qui amène les fumées de l'extérieur du poêle jusqu'à l'extérieur de la maison ? Pouvez-vous également estimer les dimensions (diamètre + longueur) du conduit ? Avez-vous une idée de la provenance des matériaux ? S'il s'agit de réutilisation ou d'achat de seconde main,

précisez-le.

Votre réponse : _____

Questions générales

21. Si votre poêle est constitué d'autres éléments métalliques (trappes de ramonage, trappe cendrier, tôles de revêtement, échangeur de chaleur,...), décrivez chacun d'entre eux, de quel matériau ils sont faits, leurs dimensions et leur poids si vous le connaissez. Avez-vous une idée de la provenance des matériaux ? S'il s'agit de réutilisation ou d'achat de seconde main, précisez-le.

Votre réponse : _____

22. Pouvez-vous décrire (de la même façon que pour les questions précédentes) toutes les composantes de votre poêle dont vous n'avez pas encore discuté dans vos réponses précédentes ?

Votre réponse : _____

23. Avez-vous une remarque quelconque supplémentaire à faire sur votre poêle ou son utilisation ?

Votre réponse : _____

Annexe C

Norme NF EN 15544

Cette annexe résume les principaux critères et exigences que doit respecter un poêle de masse pour être conforme à la norme NF EN 15544. Les aspects que cette norme aborde sont simplement énoncés, ils ne sont pas détaillés.

Conception et dimensionnement

- **Dimensionnement du foyer** : Le volume du foyer doit être proportionné à la capacité thermique du poêle et à la quantité de combustible prévue. Il y a des dimensions à respecter qui garantissent une combustion complète et efficace.
- **Accumulateur de chaleur** : Le poêle doit inclure un accumulateur de chaleur capable de stocker la chaleur générée lors de la combustion et de la restituer progressivement sur une période prolongée.
- **Isolation thermique** : Les parois extérieures doivent être correctement isolées pour minimiser les pertes de chaleur, tout en assurant la sécurité de l'utilisateur.
- **Évacuation des fumées** : Le système de fumisterie doit être dimensionné pour garantir une évacuation efficace des fumées, tout en respectant les normes de sécurité incendie.

Matériaux et construction

- **Matériaux réfractaires** : Les matériaux utilisés pour le foyer et l'accumulateur de chaleur doivent être réfractaires et capables de résister aux températures élevées sans se dégrader.
- **Matériaux écologiques** : Il est recommandé d'utiliser des matériaux à faible impact environnemental, tant pour la construction du poêle que pour

son isolation.

- **Construction robuste** : La construction doit être suffisamment solide pour garantir une longue durée de vie et éviter les fissures ou les déformations dues à la chaleur.

Performance énergétique

- **Rendement de combustion** : Le foyer du poêle doit fournir un rendement de combustion d'au moins 85%.
- **Émissions de polluants** : Les émissions de CO, de particules fines et d'autres polluants doivent être en dessous des seuils fixés par la norme pour garantir un impact minimal sur l'environnement.

Sécurité et utilisation

- **Sécurité incendie** : Le poêle doit être conçu pour minimiser les risques d'incendie, avec des matériaux non combustibles autour des zones les plus chaudes et une évacuation sûre des cendres.
- **Manuel d'utilisation** : Un manuel d'utilisation doit être fourni, détaillant les instructions pour une utilisation sécurisée et efficace du poêle, ainsi que les procédures d'entretien régulier.
- **Inspection et maintenance** : Le poêle doit être conçu pour permettre des inspections régulières et une maintenance facile, garantissant ainsi une longue durée de vie et un fonctionnement sûr.

Documentation et certification

- **Certification** : Pour être certifié conforme à la norme NF EN 15544, il faut une documentation attestant du respect des critères de conception, de construction et de performance.
- **Rapport de conformité** : Un rapport détaillant les tests de performance et les résultats doit être disponible pour prouver que le poêle respecte les exigences de la norme.

Annexe D

Laboratoire de recherche de l'AFPMA

Le laboratoire de recherche de l'AFPMA est doté d'un équipement complet et de haute qualité, certifié par le Comité Français d'Accréditation (COFRAC). Une vue d'ensemble de ce laboratoire est présentée ci-dessous :

Arrivée d'air

L'arrivée d'air du poêle de masse est équipée de capteurs de vitesse, de pression, et d'humidité.

Foyer et mesure de la masse de bois

Le foyer du poêle de masse du laboratoire est équipé d'une balance qui mesure en temps réel la quantité de combustible dans le foyer, permettant ainsi de suivre la quantité de bois brûlée.

Échangeur cloche

Dans la partie accumulateur du poêle de masse du laboratoire, on trouve un échangeur de type cloche. Ce type de construction pose des problèmes avec le logiciel Basic2+. Les vitesses de circulation des fumées dans les carreaux, admises par ce logiciel, vont de 1.2 m/s à 6.0 m/s. Cependant, pour limiter les pertes de charge des fumées, il peut être intéressant de diminuer cette vitesse en augmentant le volume des carreaux de l'accumulateur pour un même débit. Cette configuration

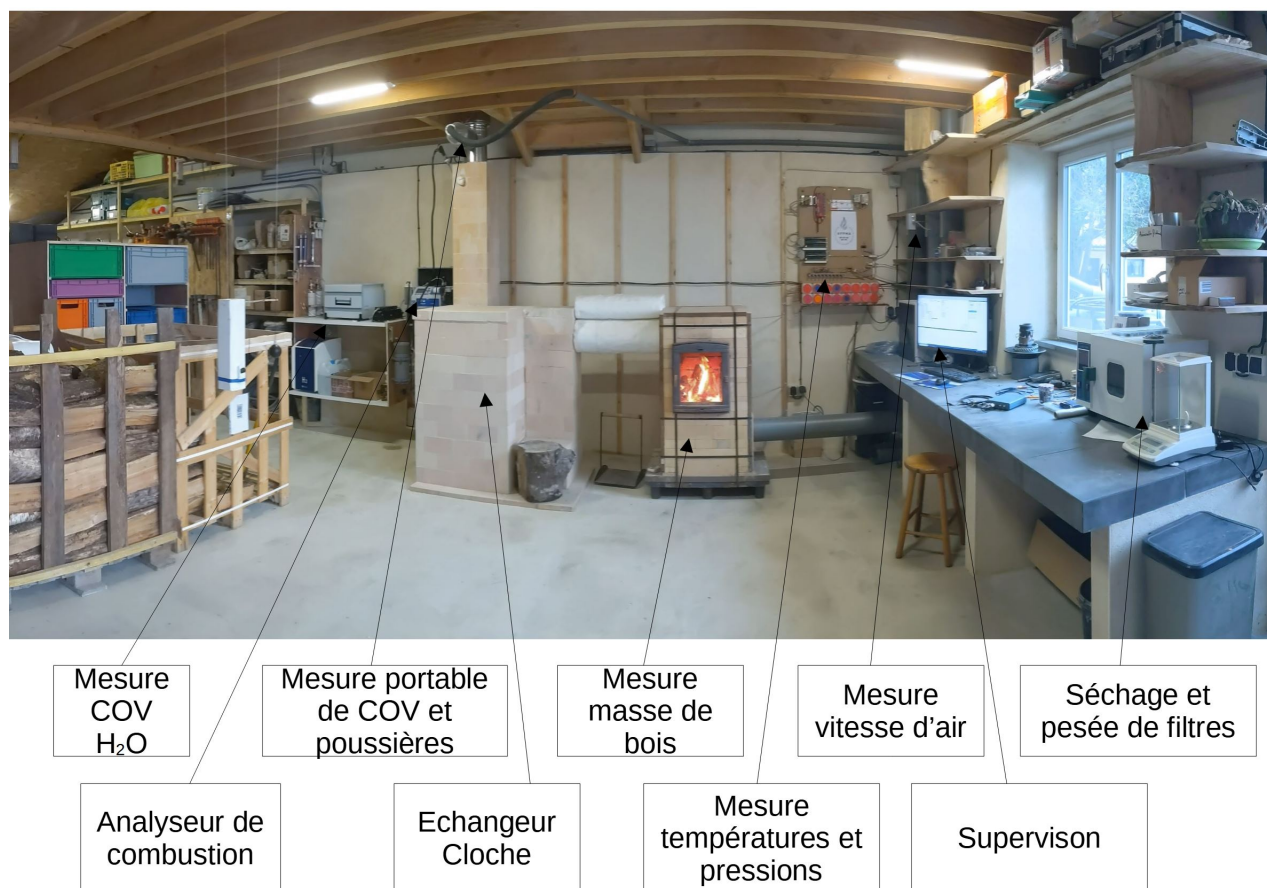


FIGURE D.1 – Vue d'ensemble du laboratoire (source : AFPMA)

est connue sous le nom de "cloche". Un schéma illustrant cette configuration est présenté en figure [D.2](#).

Mesure des températures et pressions

Tout au long de leur parcours dans l'accumulateur, la pression et la température des fumées sont mesurées à différentes sections. Concernant la température, celle-ci est mesurée à plusieurs endroits (du milieu du conduit jusqu'à la paroi) sur une même section, et une moyenne est calculée.

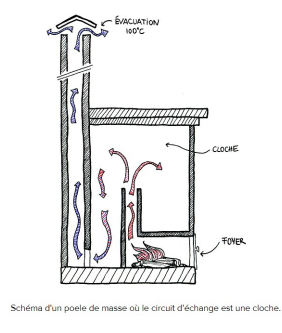


FIGURE D.2 – Échangeur cloche (source : [18])

Analyseur de combustion

Un analyseur de combustion est placé à la sortie de l'accumulateur. Cet appareil mesure la composition des fumées en termes de O_2 , CO_2 , CO , et NO .

Système de mesure de COV homologué

Le laboratoire dispose d'un système de mesure des COV conforme aux normes européennes.

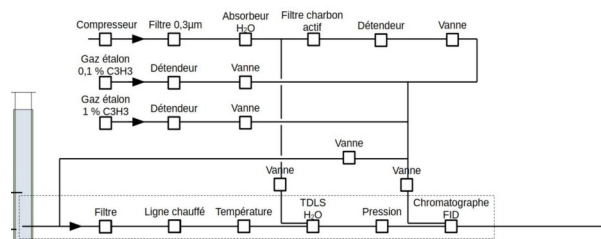


FIGURE D.3 – Système de mesure de COV (source : AFPMA)

Voici une explication détaillée de chaque composant et de son rôle dans le processus d'analyse :

- **Compresseur** : Fournit l'air comprimé nécessaire au fonctionnement du système.
- **Filtre 0,3 µm** : Élimine les particules fines de l'air comprimé pour éviter toute contamination de l'échantillon de fumée.
- **Absorbeur H_2O** : Retire l'humidité de l'air comprimé.

- **Filtre charbon actif** : Élimine les impuretés gazeuses de l'air.
- **Détendeur** : Régule la pression des gaz étalons pour permettre une injection contrôlée.
- **Vannes** : Contrôlent le flux des gaz à travers le système, permettant de les diriger vers les différentes parties selon les besoins de l'analyse.
- **Gaz étalon (0,1% et 1% C₃H₆)** : Utilisés pour étalonner le système d'analyse et assurer la précision des mesures.
- **Filtre** : Élimine les particules des fumées avant l'analyse.
- **Ligne chauffée** : Maintient les échantillons de fumées à une température stable pour éviter la condensation des gaz.
- **TDLS H₂O (Tunable Diode Laser Spectroscopy pour H₂O)** : Mesure la teneur en vapeur d'eau des fumées pour corriger les analyses et obtenir des résultats précis.
- **Chromatographe FID** : Quantifie les composés organiques volatils (COV) grâce à la détection par ionisation de flamme.

Processus Global

1. **Préparation de l'air comprimé** : L'air comprimé est purifié à travers des filtres, un absorbeur H₂O, et un filtre à charbon actif.
2. **Étalonnage** : Les gaz étalons sont régulés et utilisés pour calibrer le système chromatographe FID.
3. **Prélèvement des échantillons** : Les fumées sont prélevées via une sonde chauffée, filtrées, et maintenues à température pour éviter la condensation.
4. **Analyse des gaz** : Les fumées passent par le TDLS H₂O, le capteur de pression, et sont finalement analysées par le chromatographe FID pour mesurer la quantité de COV.

Système de mesure portable de COV et de PM

Le laboratoire possède également un système mobile d'analyse des microparticules (PM) et des comp

1. Le gaz étalon C₃H₆ est lui-même un COV

Bibliographie

- [1] Commission européenne - "Le pacte vert pour l'Europe" - 15 janvier 2020 : https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr
- [2] Easyenergy - "Interdiction de la chaudière au mazout en Wallonie : faisons le point" - 26/03/2024 <https://blog.easyenergy.be/interdiction-chaudiere-mazout-wallonie/>
- [3] VRT - "C'est officiel : le raccordement au gaz sera interdit dès 2025 dans les nouvelles constructions en Flandre" - 16/06/2022 <https://blog.easyenergy.be/interdiction-chaudiere-mazout-wallonie/>
- [4] SPF Economie, P.M.E., Classes moyennes et Energie - "Belgian Energy Data Overview édition été 2023" - 4 juillet 2023 : <https://economie.fgov.be/fr/publications/belgian-energy-data-overview>
- [5] ADEME - "Bien se chauffer au bois pour moins polluer" - 24 octobre 2023 : <https://agirpouurlatransition.ademe.fr/particuliers/maison/bien-chauffer-bois-moins-polluer>
- [6] Ryan C. Daileda, Trinity University - " PDE : The one dimensional heat equation : Neumann and Robin boundary conditions" - February 28, 2012 : http://ramanujan.math.trinity.edu/rdaileda/teach/s12/m3357/lectures/lecture_2_28_short.pdf
- [7] Pascal Pierret pour l'AFPMA - Poêle de masse et amenée d'air : choisir l'installation étanche ou non ? - 10 avril 2019 : <https://www.afpma.pro/2019/04/10/poele-de-masse-et-amenee-dair-choisir-linstallation-etanche-ou-non/>
- [8] CoolProp python module, "CoolProp Reference Manual," Gurobi, 2023. <http://www.coolprop.org/v4/apidoc/CoolProp.html>.
- [9] SlowHeat : quelques mots sur le projet, Novembre 2021 https://www.slowheat.org/_files/ugd/c1433a_c74e466c47ac4d3ca4e97cba33b3e450.pdf
- [10] SlowHeat en bref, 8 Novembre 2022 <https://www.slowheat.org/post/slowheat-en-bref>.

- [11] SlowHeat : Avoir chaud en sortant de la douche! <https://www.slowheat.org/post/avoir-chaud-en-sortant-de-la-douche>
- [12] SlowHeat : Avoir chaud en télétravaillant <https://www.slowheat.org/post/avoir-chaud-en-t%C3%A9l%C3%A9travaillant>.
- [13] SlowHeat : Avoir chaud quand on va au lit, dort et/ou sort du lit! <https://www.slowheat.org/post/avoir-chaud-quand-on-va-au-lit-dort-et-ou-sort-du-lit>.
- [14] Lave, J., & Wenger, E. (1991). *Situated Learning : Legitimate Peripheral Participation*. Cambridge : Cambridge University Press.
- [15] Wenger, E. (1998). *Communities of Practice : Learning, Meaning, and Identity*. Cambridge : Cambridge University Press.
- [16] Wenger, E., McDermott, R., & Snyder, W. (2002). *Cultivating Communities of Practice : A Guide to Managing Knowledge*. Harvard Business School Press.
- [17] Cofrac - découvrir l'accréditation <https://www.cofrac.fr/laccréditation/decouvrir-laccréditation>
- [18] Yasin Gach, "UZUME - Les différentes parties d'un poêle de masse - le circuit d'échange" <https://www.uzume.fr/parties-poele-de-masse>
- [19] Inies - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE – MINISTÈRE EN CHARGE DU LOGEMENT, "Brique réfractaire [section int. 33x33cm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT (v.1.2)", 26/10/2022 <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/infos-produit>
- [20] Inies - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE - "Trappe de visite en acier laqué - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT (v.1.2)", 27/10/2022 <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=31974>
- [21] Inies - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE - "Habillage de façade en tôle acier perforée - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT (v.1.1)", 29/04/2022 <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=29755>
- [22] Inies - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE - "Fenêtre double vitrage en bois-aluminium [$U_w = 1,3 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$] [Gestion durable] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT (v.1.3)", 13/12/2021 <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=28196>
- [23] Inies - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE - "Conduits de fumisterie - Acier [diamètre nominal 20 cm; double paroi] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT (v.1.4)", 20/10/2023 <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=35424>

- [24] Glossaire INIES - Définition de la fiche environnementale et sanitaire (FDES), <https://www.inies.fr/glossaire/#glossaire-1830>
- [25] INIES, la base de données environnementales et sanitaires de référence <https://www.inies.fr/>
- [26] Eric R. Labelle, Kevin J. Lemmer - "Selected Environmental Impacts of Forest Harvesting Operations with Varying Degree of Mechanization", 2017 <https://crojfe.com/archive/volume-40-no.2/selected-environmental-impacts-of-forest-harvesting-operations-with-varying-degr>
- [27] Mirna Zgheib - "Bois-Energie et ACV : vers un modèle dédié pour la réduction des impacts environnementaux et sanitaires", 16/01/2023 https://theses.hal.science/tel-03941681v1/file/2022MULH5046_these_ZGHEIB.pdf
- [28] Electricity Map - Mix électrique de l'année 2023 <https://app.electricitymaps.com/zone/BE>
- [29] CO2 logic, energie ID - Liste des facteurs d'émission <https://www.facteursdmissionco2.be/facteurs>
- [30] MAES - energy & mobility "DIESEL B7 FICHE D'INFORMATION PRODUIT" <https://www.maesmobility.be/app/uploads/2022/02/DIESEL-FR.pdf>
- [31] Yasin Gach - "Fiche technique Medi Batchblock" <https://www.uzume.fr/plans-poeles-de-masse/medi-batchblock>
- [32] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Working Group 1 - "Indirect GWPs" <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/249.htm#:~:text=C0%20has%20a%20small%20direct,is%20therefore%20not%20considered%20here.>
- [33] Wikipédia - "Méthane - Contribution au réchauffement climatique - Gaz à effet de serre" <https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thane>
- [34] Tutiempo Climate Data - Belgium 2023 - "Climate Florennes" <https://www.facteursdmissionco2.be/facteurs>
- [35] CO2 emissiefactoren - "Lijst emissiefactoren" - Laatste update : 22 januari 2024 <https://www.co2emissiefactoren.nl/lijt-emissiefactoren/>
- [36] TotalEnergies - "Est-ce que le hêtre est un bon bois de chauffage?" - 01/09/2020 <https://www.proxi-totalenergies.fr/particuliers/actualites/est-ce-que-le-hetre-est-un-bon-bois-de-chauffage>
- [37] David T Allen - "Methane emissions from natural gas production and use : Reconciling bottom-up and top-down measurements" - August 2014 https://www.researchgate.net/publication/263283839_Methane_emissions_from_natural_gas_production_and_use_Reconciling_bottom-up_and_top-down_measurements

- [38] David T Allen - "Methane emissions from natural gas production and use : Reconciling bottom-up and top-down measurements" - August 2014 <https://fr.air-q.com/grenzwerte#:~:text=En%20g%C3%A9n%C3%A9ral%2C%20la%20valeur%20moyenne,UE%20et%20de%20l'OMS.>
- [39] Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires - "Tableau des normes Qualité de l'Air" -Origine des valeurs : Organisation Mondiale de la Santé, Union européenne et France https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/01_Tableau-Normes-Seuils%20r%C3%A9glementaires.pdf
- [40] Inies - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE - "Petits éléments de maçonnerie en briques de terre comprimée ou extrudée pour mur non porteur" - 14/12/2021 <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/infos-produit>
- [41] Inies - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE - "Pompe à chaleur (PAC) AIR/EAU assurant le chauffage seul en maison individuelle [P=5 kW] [PRG supérieur à 750] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.3)" - 19/09/2023 <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=35004>
- [42] Geotherma - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE - "Que nous apprennent le COP et le SCOP sur l'efficacité des pompes à chaleur?" <https://www.geotherma.be/fr/que-nous-apprennent-le-cop-et-le-scop-sur-lefficacite-des-pompes-a-chaleur/>
- [43] Inies - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE - "[E+C-] Mise à disposition d'un kWh d'électricité pour les autres usages dans un bâtiment tertiaire - DONNEE ENVIRONNEMENTALE CONVENTIONNELLE (v.1.1)" - 24/05/2021 <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=5524>
- [44] Inies - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE - "[E+C-] Mise à disposition d'un kWh d'électricité pour l'usage de chauffage dans un bâtiment résidentiel" - 24/05/2021 <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=5515>
- [45] Inies - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE - "[E+C-] Combustion d'un kWh de gaz naturel en chaudière - DONNEE ENVIRONNEMENTALE CONVENTIONNELLE (v.1.1)" - 24/05/2021 <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=5506>
- [46] Inies - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE - "Chaudière gaz au sol [P=12kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.3)" - 16/12/2022 <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=32694>

- [47] Inies - MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE - "Poêle à bois [P=6kW] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (v.1.4)" - 27/10/2022 <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=32694>
- [48] Poêle à bois WABI - Notice particulière d'utilisation et d'installation - 06/05/2013 https://media.castorama.fr/is/content/Castorama/3244336122440_gte_frpdf
- [49] Secten – le rapport de référence sur les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France - 19/06/2024 https://ressources.citepa.org/Comm_Divers/Secten/Citepa_Secten%202024.pdf
- [50] Ineris – Evaluation de l'impact des appareils de chauffage domestique à bois sur l'air intérieur et extérieur - 21/04/2006 <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRC-08-70801-15219A2.pdf>
- [51] Synthèse des études à l'émission réalisées par l'Ineris sur la combustion de bois en foyers domestiques - 04/05/2018 <https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRC-17-164787-10342A.pdf>
- [52] P. Butschbach, F. Hammer, H. Kohler, A. Potreck, T. Trautmann - Extensive reduction of toxic gas emissions of firewood-fueled low power fireplaces by improved in situ gas sensorics and catalytic treatment of exhaust gas - 28/03/2009 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400508008204?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8b10424a6f7eb77d
- [53] Ojha, B., Illyaskutty, N., Knoblauch, J., Balachandran, M. R., and Kohler, H. : High-temperature CO/HC gas sensors to optimize firewood combustion in low-power fireplaces, J. Sens. Sens. Syst., 6, 237–246, <https://doi.org/10.5194/jsss-6-237-2017>, 2017. <https://jsss.copernicus.org/articles/6/237/2017/>
- [54] Heat Geek - "Benefits of Low-temperature Heating Systems" - 01/11/2018 <https://www.heatgeek.com/benefits-of-low-temperature-heating-systems/>
- [55] AFPMA - "Foire aux questions : Quels sont les avantages d'un poêle de masse par rapport à un poêle en fonte" <https://www.afpma.pro/foire-aux-questions/>
- [56] ADEME - "Guide pratique : se chauffer au bois" - Avril 2016 <https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2014/11/guide-pratique-se-chauffer-au-bois.pdf>
- [57] Glossaire INIES - Déclaration environnementale par défaut (DED), 2016 <https://www.inies.fr/glossaire/#glossaire-4650>
- [58] WeLoop - "L'Analyse Sociale du Cycle de Vie (ACV sociale) : Comprendre les impacts sociaux des organisations" : <https://www.weloop.org/>

[fr/acv-sociale/#::~text=L'Analyse%20du%20Cycle%20de%20Vie%20\(ACV\)%20s',Utilisation%20%3B%20Recyclage%20et%20Elimination\).](#)

École polytechnique de Louvain

Le poêle de masse comme solution écologique : sélection de matériaux, impact environnemental et aspects socio-techniques.

Auteur: **Bertrand ANCIAUX**

Promoteurs: **Tom DEDEURWAERDERE, Pascal JACQUES, Thomas PARDOEN**

Lecteur: **Geoffrey VAN MOESEKE**

Année académique 2023–2024

Master [120] : ingénieur civil électromécanicien

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl