

# Production d'énergie à partir de la biomasse



Etudiants :

Léa Simonnet

Omar Elfarouk

Lucie Bècle

Robin Muller

Emilie Pajot

Othmane Nassik

Enseignant-responsable du projet :

Angel Alfonso Martinez



Date de remise du rapport : **12/06/2021**

Référence du projet : **STPI/P6/2021 – 08**

Intitulé du projet : **Production d'énergie à partir de la biomasse**

Type de projet : **Expérimental, Bibliographie**

Objectifs du projet :

- **Comprendre le fonctionnement de la production d'énergie à partir de la biomasse dans une chaudière**
- **Étudier les différentes émissions d'une chaudière domestique**
- **Réaliser des graphiques à partir de données expérimentales**
- **Travailler en groupe**

Mots-clefs du projet (4 maxi) :

**Biomasse – Combustion – Energie – Emissions**

## Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont rendu ce projet réalisable malgré les conditions sanitaires actuelles.

En premier, nous voulons remercier notre chargé de projet, Monsieur Angel Alfonso Martinez, qui nous a guidés tout au long de ce projet. Il a su nous écouter, et se rendre disponible chaque semaine pour nous permettre d'avancer malgré le système de co-modalité.

Il est aussi important pour nous de remercier l'INSA, pour nous avoir donné la possibilité de travailler sur un sujet qui nous plait avec le matériel nécessaire à sa mise en œuvre.

## Table des matières

1. Introduction .....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail .....	7
3. Travail réalisé et résultats .....	8
3.1. Recherches – Lecture d'articles .....	8
3.1.1. Qu'est-ce que la biomasse ? .....	8
3.1.2. Principe de la combustion .....	8
3.1.3. Emissions de particules par combustion de la biomasse .....	9
3.1.4. Transformation de la biomasse .....	10
3.1.5. Comparaison combustion de la biomasse - combustion du charbon .....	11
3.1.6. Impact sur l'environnement .....	12
3.2. Expérimental .....	13
3.2.1. Matériel utilisé .....	13
3.2.2. Fichier « chaudière » .....	15
3.2.3. Fichier Testo .....	16
3.2.4. Fichier PPS .....	18
3.2.5. Programme Python .....	19
4. Conclusions et perspectives .....	21
5. Bibliographie .....	22
6. Annexes .....	24

## NOTATIONS, ACRONYMES

- **PAH** : Polycyclic Aromatic Hydrocarbon = Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) = sous-famille des hydrocarbures aromatiques, c'est-à-dire des molécules constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène mais dont la structure comprend au moins deux cycles aromatiques condensés.
- **ELPI** : Electrical Low Pressure Impactor.
- **APSS** : Sampling system (=Système d'échantillonnage).
- **TEOM** : Tapered Element Oscillating Microbalance (=Microbalance oscillante à élément conique).
- **Testo 350** : Analyzer unit for flue gas analysis system (= Appareil d'analyse pour système d'étude des fumées).
- **PPS** : Analyseur de particules haute dynamique.
- **FPS** : Fine Particle Sampler (=Échantillonneur de particules fines).
- **SMPS** : Scanning Mobility Particle Sizer (= Spectromètre de mobilité électrique).
- **TOC** : Total Organic Carbon (=Carbone organique total).
- **NO<sub>x</sub>** = NO et NO<sub>2</sub>.

# 1. INTRODUCTION

La combustion de la biomasse reste à ce jour une des sources principales de production d'énergie utilisées dans le monde, et cela dans différents domaines.

Bien qu'elle soit une technique assez ancienne, nous sommes loin d'en connaître toutes les facettes. Il est donc intéressant d'en apprendre davantage sur son mécanisme de combustion.

Un des objectifs de ce projet est de nous familiariser avec la biomasse et le principe de combustion et ses différentes méthodes. Etudier les particules entrant en jeu dans ce processus de combustion, ainsi que son impact sur l'environnement nous a aussi semblé important.

De plus, ce projet nous a permis d'étudier précisément toutes les données provenant d'une chaudière domestique à granulés de bois. Ainsi, nous avons pu visualiser avec des résultats concrets ce que nous avons compris de nos recherches. Nous avons notamment réalisé des graphiques qui traduisent les données que nous avons calculées.

Enfin, ce projet a pour objectif de nous faire travailler en groupe, ce qui nous prépare à notre future vie d'ingénieur.

## 2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Pendant plusieurs semaines, nous avons travaillé à 6 sur ce projet de physique. Pour un travail de groupe aussi conséquent que celui-ci, il a fallu se répartir les tâches équitablement, et beaucoup communiquer pour avancer de manière efficace et finir dans les temps.

Tout d'abord, en ce qui concerne la répartition du travail, elle s'est faite assez naturellement. A la fin de chaque séance de projet physique, nous listions un certain nombre de recherches à faire pendant la semaine, pour la séance d'après. Chaque membre du groupe choisissait alors une recherche en particulier à traiter, soit celle qui lui semblait la plus simple, ou la plus intéressante. En revanche, pour les recherches plus complexes, et les calculs nous essayions de nous mettre à plusieurs, pour échanger des idées et avancer plus vite.

Concernant la progression de notre projet, nous avons commencé par lire plusieurs articles par semaine, pour recueillir le maximum d'informations sur notre sujet. Nous choisissions chacun un ou deux articles à lire et à résumer à l'écrit pour la séance d'après. Chaque membre du groupe faisait également un résumé oral de son article pendant la séance pour informer les autres membres du groupe. Cette phase clé de notre projet nous a permis de bien comprendre le sujet à traiter, et de le voir sous plusieurs angles différents. Les articles étant en anglais, ils nous ont aussi permis d'acquérir un meilleur vocabulaire scientifique en anglais. Ensuite, nous avons commencé la partie expérimentale de notre projet. Notre professeur encadrant nous a fourni plusieurs fichiers de données expérimentales, que nous avons essayé d'analyser tous ensemble, au maximum en présentiel, pour avoir son avis et pour partager nos idées. Enfin, pour la rédaction du rapport, nous avons commencé par organiser un plan tous ensemble et chacun a choisi les parties qui lui convenaient le mieux. La dernière phase du projet a été la mise en page, la relecture, la réalisation de l'affiche et la préparation de l'oral.

Nous pouvons également parler de la communication qui a été essentielle tout au long de ces semaines de travail. En effet, dès le début du projet, nous avons créé un groupe sur lequel nous communiquions régulièrement, pour se tenir au courant des avancées de la semaine. Nous avons également créé un Drive qui nous permettait de directement regrouper nos recherches hebdomadaires pour faciliter la rédaction du rapport. On y mettait les résumés d'articles, les résumés de séance de projet, et tous nos calculs pour la partie expérimentale.



## 3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

### 3.1. Recherches – Lecture d'articles

#### 3.1.1. Qu'est-ce que la biomasse ?

La biomasse est une forme d'énergie neutre en carbone et complètement renouvelable exploitée depuis des millénaires par l'Homme [A]. Cette énergie est produite grâce aux différentes matières organiques existantes dans la nature. Ces dernières regroupent des produits biodégradables, déchets et résidus en provenance de l'agriculture y compris les substances végétales et animales, sans oublier les déchets industriels et ménagers [B]. Elle permet de produire de l'énergie sous différentes formes : électricité, chaleur, gaz ou encore carburant.

En milieu urbain, elle est présente principalement dans les centrales électriques, la cuisine, le chauffage, le traitement des déchets ou encore lors d'un incendie dans un bâtiment. Au contraire, on trouve dans les milieux ruraux ou éloignés des feux de forêts, des combustions dues à l'agriculture ou à l'élimination de détritrus [1].

Bien qu'elle représente 63% de l'énergie produite dans l'Union Européenne, l'énergie formée à partir de la combustion de la biomasse, la bioénergie, est moins connue par les populations que d'autres énergies renouvelables [D].

La biomasse est généralement considérée comme un combustible "vert" en termes de production d'énergie car les émissions du CO<sub>2</sub>, un gaz à effet de serre, sont plus faibles que pour les combustibles fossiles. En effet, lors de sa combustion, la biomasse libère du CO<sub>2</sub> mais les plantes et végétaux l'ont capté dans l'atmosphère durant leur croissance [C]. Il n'y a donc pas de nouvelle émission de CO<sub>2</sub>. On dit que le cycle du carbone est neutre ou fermé (voir annexe 1). La bioénergie ne participe pas au réchauffement climatique tant que les systèmes d'exploitation agricoles et forestiers sont durables et responsables. Le recours à ce type d'énergie contribue également à la gestion des déchets ainsi qu'à la sécurité énergétique.

#### 3.1.2. Principe de la combustion

La combustion correspond à une réaction d'oxydoréduction entre un comburant, l'oxydant, et un combustible, le réducteur [E]. Le combustible représente la matière qui va brûler, à titre d'exemple, le bois, alors que le comburant est généralement le dioxygène présent dans l'air ambiant. De plus, la réaction est déclenchée par une énergie d'activation qui peut apparaître

sous la forme d'une flamme, d'une étincelle ou encore d'une friction. L'ensemble de ces trois éléments clés forment le triangle de feu. C'est une réaction exothermique car elle libère de l'énergie sous forme de chaleur qui sert de chauffage ou permet de produire de l'électricité [F].

La combustion de la biomasse est un phénomène naturel ou contrôlé [1]. Elle consiste essentiellement à brûler les matières organiques afin de produire de l'énergie et s'arrête lors de la disparition complète du comburant ou du combustible.

La combustion complète correspond à la combustion idéale [E]. Lors de celle-ci, on produit la quantité d'énergie maximale en brûlant l'intégralité du comburant. Les seuls produits formés sont l'eau et le dioxyde de carbone.

Au contraire, une combustion incomplète a lieu quand il n'y a pas assez de comburant pour continuer la combustion [E]. Elle produit alors des déchets solides ou volatiles qui n'ont pas été entièrement consommés et qui peuvent polluer l'environnement. Ces nouveaux produits prennent alors la place du combustible. Cette combustion incomplète est présente dans la plupart des combustions dont celle de la biomasse.

### **3.1.3. Emissions de particules par combustion de la biomasse**

Lors de la combustion de la biomasse, différentes particules sont présentes dans les fumées qui sont émises dans l'atmosphère. On peut étudier la composition des fumées dues à la combustion de la biomasse, et observer la quantité et la nature de ces particules. Pour cela on utilise des marqueurs/traceurs qui sont spécifiques pour chaque type de particules [1].

La formation de particules dépend des conditions de combustions telles que l'appareil de chauffage utilisé, la charge de la chaudière, les propriétés physico-chimiques du combustible, ou encore l'excès d'air. En effet, un manque d'air lors de la combustion de la biomasse conduit à l'émissions de deux types de particules [3] :

- les particules fines < 1µm (aérosols) qui sont vaporisées pendant la combustion.
- les particules grossières > 1µm qui ne sont pas vaporisées pendant la combustion.

Par ailleurs, l'humidité de l'échantillon, la taille ou la densité des particules ont une grande influence sur les émissions.

Parmi les particules formées lors de la combustion, il y a les particules primaires formées à haute température telles que des particules de suie formées à partir des PAH, des particules organiques et de cendre.

Certaines particules formées sont des polluants dus à une combustion incomplète. On a notamment la formation de CO, PAH, NOx, ou encore TOC. La formation de certains polluants est aussi due à des constituants comme C, H, O et N, déjà présents dans le carburant. Les réduire permettrait de diminuer les gaz nocifs. Par exemple, un risque principal est de former des NOx à partir de l'azote présent dans l'air.

On trouve aussi des particules secondaires qui résultent directement de la conversion des gaz présents dans l'atmosphère.

Par ailleurs, l'augmentation de la concentration de particules dans l'air est due à des conditions de combustion insatisfaisantes, telles qu'un faible taux de combustion, une température ou un débit de gaz bas [2].

Des études ont montré que lors de la combustion de bois ou de paille, l'espèce majoritairement libérée est le sulfate de potassium alors que les combustibles plus concentrés en alcalins, comme l'herbe, libèrent majoritairement du chlorure de potassium [2]. En général, les composants des particules submicroniques sont le potassium, le chlore et le soufre.

Enfin, on observe une corrélation entre l'augmentation des concentrations de particules dans l'air ambiant, et l'augmentation de certains problèmes de santé [2].

#### **3.1.4. Transformation de la biomasse**

La combustion directe de la biomasse et la co-combustion avec le charbon sont les techniques les plus utilisées de nos jours [10]. Cependant, ce sont des techniques qui ne valorisent pas beaucoup la biomasse. C'est pourquoi des technologies plus poussées de transformation de biomasse, telles que la pyrolyse, la gazéification ou la méthanisation, se développent [4].

Transformer la biomasse avant une combustion a pour objectif d'améliorer l'efficacité de la combustion et de valoriser le combustible. En effet, on transforme un matériau solide avec peu de concentration d'énergie, en combustible avec des caractéristiques physico-chimiques le rendant plus efficace, et optimisant les conditions de combustion.

La pyrolyse est la décomposition chimique d'un par une augmentation importante de sa température, pour obtenir d'autres produits, gaz ou matière, qu'il ne contenait pas initialement [G]. C'est une technique classique de conversion de biomasse en combustible plus efficace. Les pyrolyses sont des réactions lentes, qui débutent à des températures assez basses, environ 200°C, avec un milieu très limité en oxygène, voire sans oxygène. La température

augmente ensuite jusqu'à environ 1000 °C. A la fin on récupère le gaz combustible riche en hydrocarbure, un liquide « huileux », et un résidu solide riche en carbone. C'est une technique très efficace de transformation de biomasse.

La gazéification (voir annexe 2) consiste à convertir des matières carbonées, organiques, en gaz de synthèse, le combustible [H]. C'est une forme de pyrolyse à hautes températures, plus récente. Le résultat est un mélange de monoxyde de carbone, hydrogène, méthane, dioxyde de carbone et azote. Ce gaz peut être utilisé dans les turbines à gaz pour produire de l'électricité ou brûlé pour produire de la chaleur et de la vapeur. Elle permet d'améliorer l'efficacité de la combustion, et réduire le coût de production d'électricité.

Quant à la méthanisation, elle consiste à isoler en milieu fermé les matières organiques qui composent la biomasse, de manière à ce qu'elles se décomposent sous l'action de bactéries [I]. Cette réaction se réalise en l'absence totale d'oxygène. A la fin, on obtient le combustible appelé biogaz, qui contient du CO<sub>2</sub>, du CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub>S. On retrouve aussi du digestat, un résidu souvent utilisé comme compost fertilisant dans le domaine de l'agriculture.

### **3.1.5. Comparaison combustion de la biomasse - combustion du charbon**

La biomasse est différente du charbon dans de nombreux aspects, que ce soit la teneur en énergie organique, inorganique et les propriétés physiques [4]. En effet, par rapport au charbon, la biomasse a généralement moins de carbone, d'aluminium et de fer mais plus d'oxygène, de silice et de potassium (voir annexe 3). Elle a aussi un moins bon pouvoir calorifique et une plus grande humidité ainsi qu'une plus petite densité et friabilité.

Les différences entre la biomasse et le charbon existent aussi lors de la combustion de ces derniers. En analysant des échantillons de certaines biomasses comme le bois, le colza, les déchets, la sciure, l'écorce de chêne, le peuplier (voir annexe 4) et le charbon, on constate une corrélation entre la température, le débit d'air et les concentrations des émissions des principaux polluants générés lors de la combustion tels que le CO, le NO et les composés organiques [13]. En effet, à débit identique, les émissions de NO du charbon sont plus importantes que celles du bois à hautes températures mais plus faibles à basses températures. Ces effets sont inversés concernant les émissions de CO. Enfin, les émissions de TOC sont plus importantes dans la combustion du bois.

### **3.1.6. Impact sur l'environnement**

Certaines régions du monde où la qualité de l'air est médiocre, font face à des déséquilibres environnementaux liés à l'utilisation de la biomasse [J]. En effet, les émissions atmosphériques sont devenues un obstacle majeur au développement des systèmes de combustion à cause du coût des contrôles et des compensations d'émissions.

De plus, les préoccupations récentes en matière de qualité de l'air liées à la combustion de la biomasse concernent les émissions de particules, les NOx, SOx, et les produits de combustion incomplète [15]. Les installations de combustion du bois résidentielles et industrielles, en particulier les usines équipées de séchoirs à combustible, émettent des composés organiques volatils et des particules fines [K].

Par ailleurs, les anciens systèmes de chauffage non automatiques posent un problème car les émissions sont moins bien gérées. L'utilisation de bois ou de charbon de bois dans des foyers mal conçus ou mal ventilés peut entraîner des problèmes de santé pour les habitants [L].

Enfin, la déforestation et l'expansion de l'agriculture provoquent une diminution des terres forestières et limitent donc la durabilité de la bioénergie [13]. En effet, la biomasse n'est pas renouvelée.

## 3.2. Expérimental

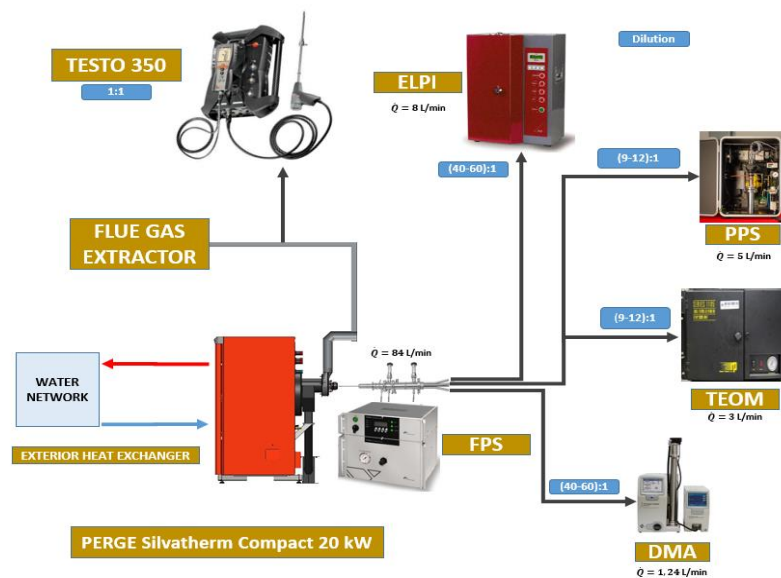
Notre encadrant Monsieur Martinez nous a donné l'ensemble des fichiers de données et le programme python.

### 3.2.1. Matériel utilisé

Il existe de nombreuses techniques de mesure pour repérer et caractériser les différentes particules. Ils sont choisis en fonction de la taille des particules et de leurs avantages. Nous pouvons les séparer en deux types :

- Les instruments spécifiques pour mesurer la concentration massique (exemple annexe 5).
- Les instruments spécifiques à la composition chimique. Ces derniers utilisent les techniques de spectroscopie, spectrométrie, microscopie électronique et émission de rayons X.

Pour notre projet, nous avons utilisé certains de ces appareils de mesure que vous pouvez voir sur le schéma suivant.



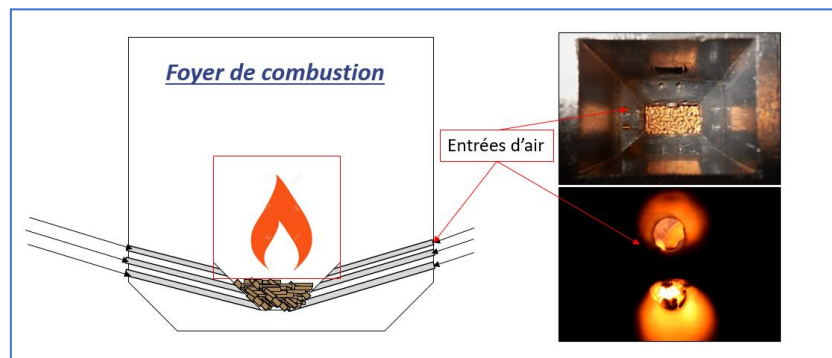
Mais tout d'abord, nous allons expliciter le fonctionnement de la chaudière (voir annexe 6).

### Fonctionnement de la chaudière

Le système de combustion choisi pour ces expériences est la chaudière à pellets PERGE Silvatherm Compact 20 CGR, qui est une chaudière de petite puissance, soit 20 kW.

Ce système fonctionne avec une vis sans fin qui permet d'alimenter la chambre à combustion par le haut. Les pellets de bois sont chargés manuellement et envoyés dans la chambre à combustion par la vis qui fonctionne en mode continu et pulsé. Cette vis d'alimentation a été

calibrée afin de déterminer le taux de consommation de pellets. Il est compris entre 0.9 et 1,5 gr/s. Le ventilateur d'extraction, quant à lui, est utilisé pour extraire les produits de combustion du four à la sortie de l'échangeur à eau.



L'air rentre par aspiration naturelle dans la chambre de combustion. Cela se fait par le biais d'orifices qui sont répartis sur trois rangés à des hauteurs différentes dans le foyer.

La chambre de combustion possède également un échangeur de chaleur interne. Sa fonction principale est de dissiper la puissance produite. À l'entrée des tubes de cet échangeur de chaleur, il existe un système physique qui permet de piéger les grosses cendres produites lors de la combustion. Ces dépôts de cendres doivent être nettoyés régulièrement pour éviter d'endommager la chaudière.

### **Appareils de mesure**

Nous allons maintenant décrire les appareils de mesure que nous avons utilisés.

Tout d'abord, le FPS. Son rôle est de diluer et conditionner les échantillons de gaz et aérosols, pour les appareils de mesure. Son principe de fonctionnement repose sur un système de dilution en deux étapes. Une fois que l'échantillon de gaz est extrait de la source, et qu'il entre dans le FPS, il subit la première dilution (voir annexe 7). Le facteur de dilution peut être réglé en changeant le débit d'air dans le premier tube perforé. Lors de la deuxième dilution, une pompe d'éjection déplace l'échantillon du premier tube perforé, et le dilue plus bas. L'éjecteur possède trois facteurs de dilution : petit, moyen, et grand. Les paramètres des dilutions sont contrôlés par une petite unité de contrôle. On retrouve notamment les températures et les pressions de dilution, mesurées en temps réel, mais aussi les facteurs de dilution.

Ensuite, nous avons utilisé le ELPI pour faire des mesures physiques [3]. C'est une colonne comprenant 13 plateaux qui fonctionnent comme des tamis. En effet, toutes les particules sont déposées en haut de la colonne et tombent ou sont retenues sur les plateaux en fonction de leur diamètre. Le ELPI est utile surtout pour les grosses particules (diamètre de 10 $\mu$ m) et a une bonne résolution temporelle.

Le SMPS, quant à lui, sert à mesurer la distribution de taille des nanoparticules [3]. Cet appareil repose sur une technique de balayage rapide et continue, qui donne des résultats très précis. Il mesure la taille des particules, en se basant sur le diamètre de mobilité des porteurs de charge. En fonction de ce paramètre, les particules tombent sur les plateaux et s'y « collent » rapidement ou non. Il contient environ 100 plateaux différents et présente donc l'avantage de compter tous les diamètres possibles. Cependant, il est surtout utilisé pour les petites particules ( $>1\mu\text{m}$ ).

Par ailleurs, on retrouve également le TEOM et l'APSS qui fonctionnent ensemble. Le TEOM permet d'étalonner l'APSS grâce à la valeur moyenne des concentrations massiques de particules qu'il ressort. Il ressemble à une microbalance avec un filtre qui oscille et compte le nombre de particules et leur poids. L'APSS lui, suit l'évolution des particules en continu et nous donne leurs concentrations massiques plus précisément que le TEOM.

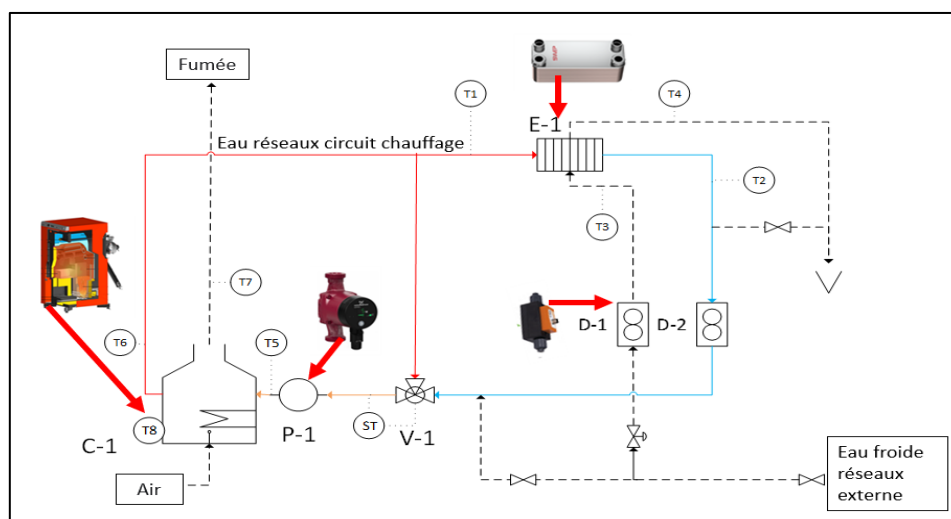
Pour continuer, le Testo 350 permet de mesurer la concentration des gaz [M]. Il possède une unité de contrôle qui simplifie la réalisation des mesures d'émission. Cet appareil a un grand écran sur lequel s'affiche les concentrations, et qui le rend d'autant plus facile à utiliser.

Enfin, le PPS sert à mesurer la concentration en nombre et en masse des particules [N]. Cet appareil est doté d'un temps de réponse très rapide, pour suivre en temps réel la concentration de l'ensemble des particules.

### 3.2.2. Fichier « chaudière »

#### Calcul de la puissance thermique et de l'efficacité de la chaudière

Nous avons étudié un système de chaudière liée à un récupérateur de chaleur. Il est composé de deux circuits, le premier où circule l'eau chaude, et le deuxième où circule l'eau froide.





Nous avons commencé par calculer les puissances thermiques, au sein de chaque circuit, grâce la formule suivante :

$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$$

$$Q : kW (J.s^{-1})$$

$$\dot{m} : kg.s^{-1}$$

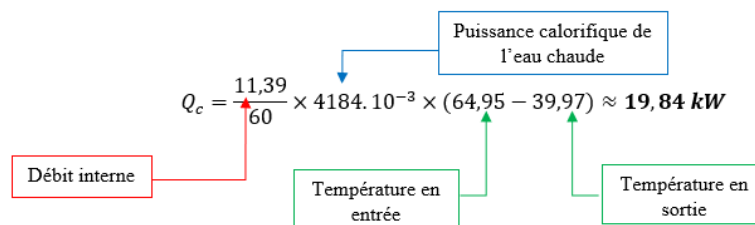
$$C_p : kJ.K^{-1}.kg^{-1}$$

$$\Delta T : K$$

Pour réaliser les calculs, nous avons utilisé les valeurs expérimentales données dans le tableur en annexe (chaudierecsv). Nous avons notamment utilisé les valeurs des débits massiques, et les valeurs des températures en entrée et sortie des circuits. Ensuite, nous avons calculé les valeurs du pouvoir calorifique de l'eau. Voici comment nous avons réalisé ces calculs :

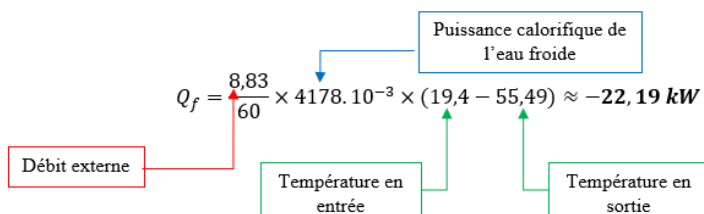
### Circuit avec l'eau chaude

Par exemple pour  $t = 0s$  :

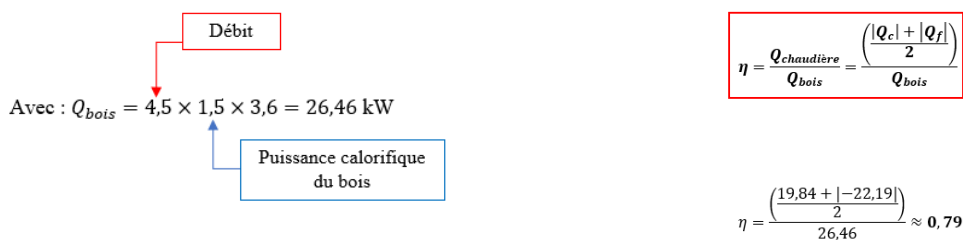


### Circuit avec l'eau froide

Pour  $t = 0s$  :



Ensuite, nous avons calculé l'efficacité thermique de la chaudière :

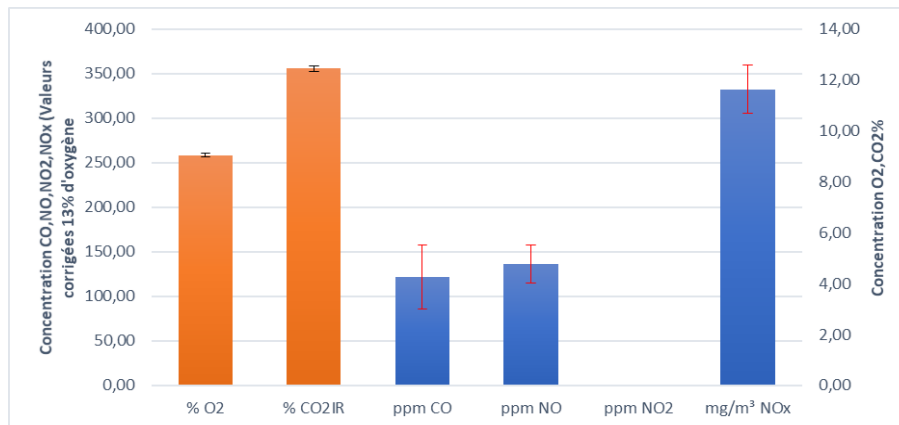


### 3.2.3. Fichier Testo

#### Etude des émissions de la chaudière

D'après le graphique réalisé grâce au logiciel Excel (voir annexe 8) on remarque que la température moyenne qui règne dans notre chaudière est comprise entre 188°C et 200°C.

Par la suite, on fait l'étude des différentes particules émises par notre chaudière. Nous avons pu alors tracer un graphique représentant les émissions de la chaudière avec les concentrations moyennes de CO, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, en ppm (partie par million) et celles de CO<sub>2</sub> et O<sub>2</sub> en pourcentage. On remarque que la concentration de NO<sub>x</sub> est très élevée par rapport à celle de NO<sub>2</sub> qui est quasiment nulle. Le graphique met aussi en évidence la concentration élevée de dioxyde de carbone 13% comparée à celle de dioxygène qui ne représente que 7,5%.



### Vérification de la valeur de CO<sub>2</sub> mesurée en sortie de la chaudière avec sa valeur théorique

Nous avons calculé les moyennes des différentes émissions observées en sortie de la chaudière.

sec	Durée	sec	Durée	°C	TF	% O <sub>2</sub>	% CO <sub>2</sub> IR	ppm CO	ppm NO	ppm NO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup> NO <sub>x</sub>	moyenne T	moyenne O <sub>2</sub>	moyenne CC	moyenne CC	moyenne NC	moyenne NC	moyenne Nox
0	0	191,1		7,02	12,71	50	69	1,5	217			200,274373	7,34043726	13,1358213	115,487453	172,414068	0,57714829	547,001521
1	1	191,1		7,06	12,71	51	69	1,5	218									
2	2	191,7		7,66	12,71	53	72	1,3	236									
3	3	191,7		7,48	12,78	58	82	1,2	265									
4	4	191,9		7,14	12,78	69	102	0,9	320									
5	5	191,9		6,78	12,78	75	109	0,9	333									
6	6	192,2		6,47	12,79	80	114	0,9	340									
7	7	192,3		6,25	12,79	85	118	0,8	347									
8	8	192,3		6,09	12,79	89	118	0,7	343									
9	9	192,4		6,09	12,79	89	120	0,7	349									
10	10	192,4		6,06	14,57	94	122	0,7	353									

Ensuite nous avons entré ces moyennes dans le fichier FUELSIM-Average. Nous avons ainsi pu observer que la valeur moyenne de CO<sub>2</sub> calculée grâce au premier fichier Excel était la même que celle que le fichier FUELSIM avait calculée.

Ainsi nous avons vérifié que la valeur de CO<sub>2</sub> expulsée par la chaudière trouvée expérimentalement était la même que la valeur théorique calculée par le fichier FUELSIM.

**FUELSIM - Average v1.2**  
 by Øyvind Skreiberg, Norwegian University of Science and Technology, Department of Energy and Process Engineering, NO-7491 Trondheim, Norway, e-mail: Oyvind.Skreiberg@ntnu.no  
 Please direct questions, comments or proposals for improvements to Øyvind Skreiberg

Introduction	Defaults	Documentation	Examples
<b>Fuel and flue gas (FG) properties</b>			
Fuel composition (weight fraction, daf)	Volume fraction	C	H
(Moisture: waf)		0,4980	0,0630
		0,0000	0,0540
		0,0000	0,0000
Burning rate kg/h (dry / wet fuel) & kg/s (wet fuel)		N	H <sub>2</sub> O
		5,108	5,400
Water injection rate kg/h & kg/s			1,500E-03
O <sub>2</sub> in wet / dry FG (vol%) & ppm (dry FG)			0,0000
CO in wet / dry FG (vol%) & ppm (dry FG)		6,4877	7,3404
NO in wet / dry FG (ppm)		0,01021	0,01155
NO <sub>2</sub> in wet / dry FG (ppm)		152,382	172,410
UHC as C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> in wet / dry FG (ppm)		0,510	0,577
SO <sub>2</sub> in wet / dry FG (ppm)		0,000	0,000

Inlet secondary air temperature (K / °C)	298,15	25,00
Weight fraction primary air of total air		1,0000
Inlet fuel (and moisture) temperature (K / °C)	298,15	25,00
Inlet water injection temperature (K / °C)	298,15	25,00
Cp mean - solid or liquid fuel (kJ/kgK)		1,255
Chimney inlet temperature (K / °C)	436,65	163,50
Combined turbine/generator el. efficiency		0,0000
Relative air humidity (%)		70
<b>Calculated values</b>		
Adiabatic combustion temperature (K / °C)	-1529,66	-1802,81
CO <sub>2</sub> in wet / dry FG (vol%) & ppm (dry FG)	11,620	13,147
Excess air ratio (Lambda)	1,5	1,535
Volume air added (Sm <sup>3</sup> /h / Nm <sup>3</sup> /h / Sm <sup>3</sup> /s)	39,234	37,191
<b>Select input volume flow</b>		
<input checked="" type="radio"/> Air <input type="radio"/> dry FG <input type="radio"/> wet FG		
<b>Select denomination</b>		
<input type="radio"/> Sm <sup>3</sup> /h <input checked="" type="radio"/> Nm <sup>3</sup> /h <input type="radio"/> Sm <sup>3</sup> /s		
		9

### Calcul de l'excès d'air, quantité d'O<sub>2</sub> à injecter dans la chaudière

Il existe 2 possibilités pour calculer le volume d'air nécessaire à injecter dans la chaudière :

- Calcul de l'air dans le foyer en prenant en compte les trois cols soniques ;
- Calcul de l'air avec les émissions d'air ;

On récupère les compositions de la biomasse calculées par le fichier Excel :

C = 49,8%, H = 6,30% et O = 43,9%.

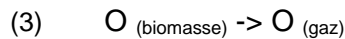
On écrit l'équation de la combustion :

$C_xH_yO_2 + a O_2 \rightarrow b CO_2 + c H_2O$  avec a, b et c des nombres entiers.

Cette équation peut être séparée en 2 selon les deux produits de la réaction :



On ajoute une équation aux précédentes, qui prend en compte l'évaporation de l'oxygène contenu dans la biomasse en vapeur. Cette quantité d'oxygène n'a pas besoin d'être injectée.



On calcule ensuite un coefficient qui correspond à l'air nécessaire à la combustion du

composant pour chaque réaction :  $\frac{-2 \times 16}{-12 \times 1} = 2,67$      $\frac{-\frac{1}{2} \times 2 \times 16}{-2 \times 1} = 8$      $\frac{-1 \times 16}{1 \times 16} = -1$

Enfin, on calcule la quantité d'oxygène en g/s nécessaire en multipliant les résultats que l'on a obtenus précédemment avec l'alimentation en oxygène de la chaudière qui vaut 1,5 g/s :

$2,67 \times 1,5 = 1,99 \text{ g/s}$                        $8 \times 1,5 = 0,756 \text{ g/s}$                        $-1 \times 1,5 = -0,66 \text{ g/s}$

En les sommant, on obtient alors le volume d'oxygène à injecter dans la chaudière :

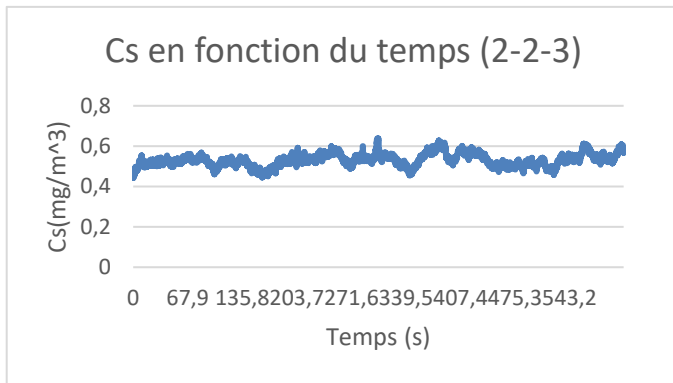
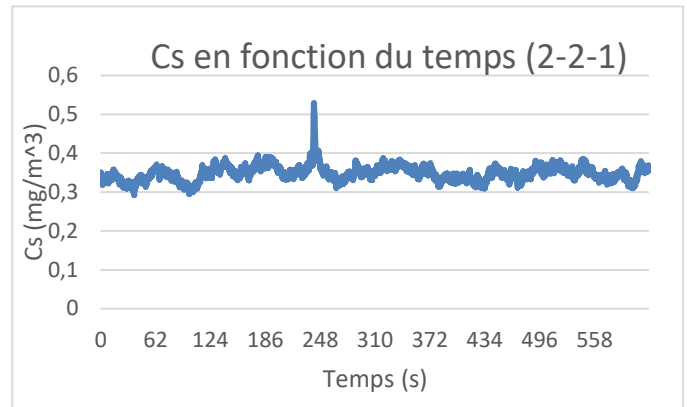
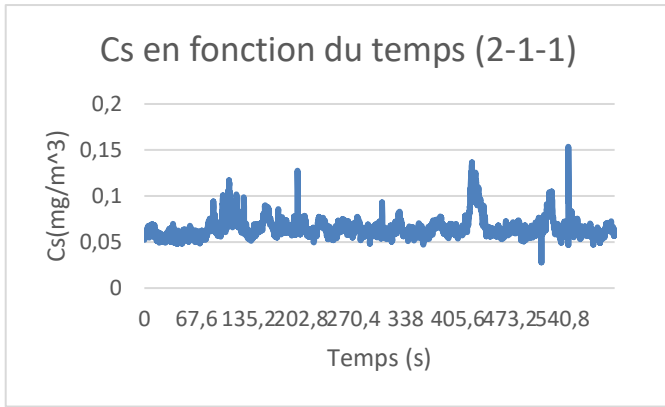
$1,99 + 0,756 - 0,66 = 2,09 \text{ g/s}$

#### **3.2.4. Fichier PPS**

Cet appareil de mesure nous permet d'obtenir la concentration (Cs) de particules en fonction du temps et ainsi de tracer les graphiques correspondants. Nous calculons Cs en  $mg/m^3$

grâce à la formule suivante :  $Cs = \frac{1}{16,666} \times \frac{K}{q_v} \times I$  où I est le courant introduit dans la chaudière,

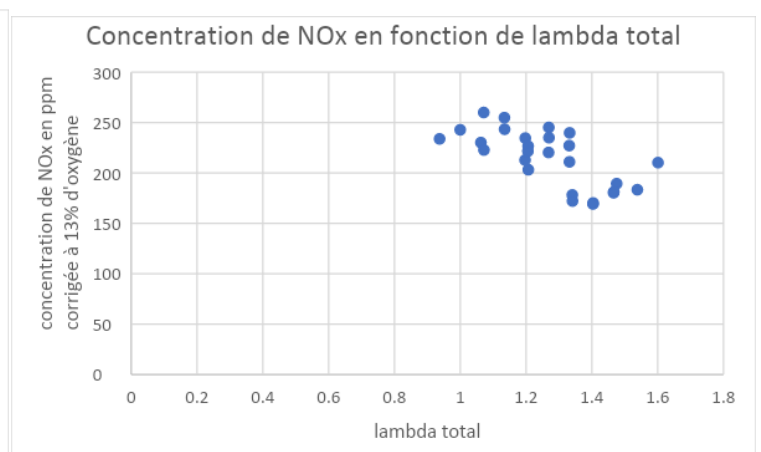
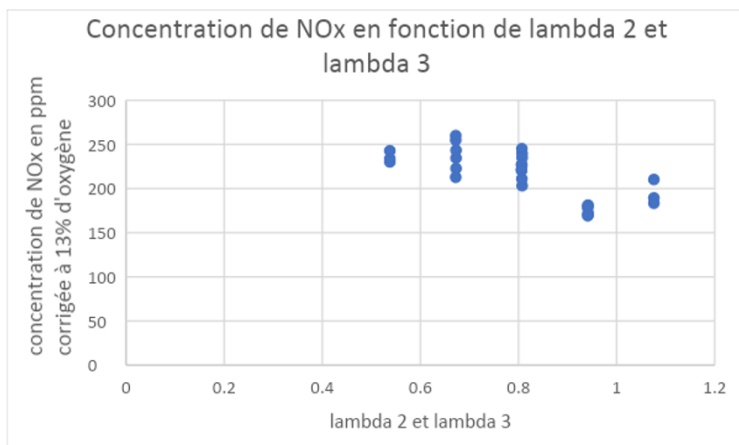
$q_v$  est le débit d'air inséré dans la chaudière avec  $q_v = 5L/min$  et K est une constante telle que  $K = 0,86$ . Cette constante a été calculée lors de l'étalonnage du PPS. Nous obtenons la concentration des particules qui sortent de la chaudière. Les chiffres, 2-1-1, 2-2-1 et 2-2-3, correspondent aux pressions de l'air en bar, injectées par les trois orifices de la chaudière.



Voici trois exemples de graphiques obtenus qui nous permettent d'observer l'évolution des émissions totales. Nous pouvons voir que pour un même débit d'air dans l'orifice du haut ( $\lambda_1, P = 2 \text{ bar}$ ) et des débits différents dans les autres orifices nous obtenons des courbes différentes.

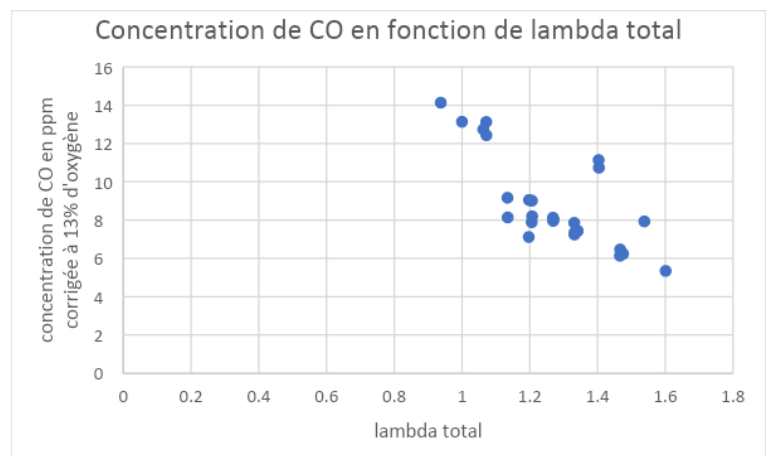
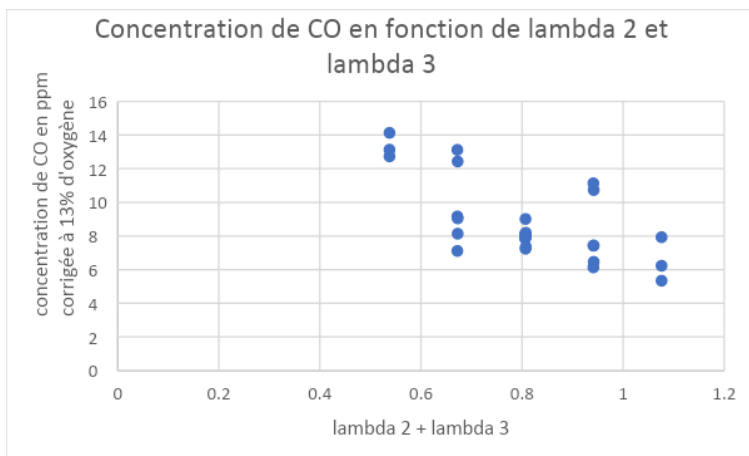
### 3.2.5. Programme Python

Nous avons utilisé un programme python pour calculer les moyennes et écart-types des émissions, comme nous l'avons déjà fait précédemment, mais pour un plus grand nombre d'expériences. Ainsi, nous avons pu regrouper les données calculées (voir annexe 9) et tracer des graphiques représentatifs des émissions en fonction des cols soniques. Nous corrigeons les concentrations à 13% d'oxygène pour pouvoir comparer les différences produites par les cols soniques (voir annexe 10).



A l'aide des deux graphiques ci-dessus, on observe que les concentrations de NOx à l'intérieur de la chaudière ont tendance à diminuer lorsque le débit d'air augmente. Néanmoins, il est plus simple de le constater sur le premier graphique. En effet, le NOx se forme en fonction de la quantité d'azote présente, au niveau du pellet de bois en combustion. Il introduit par ces

deux lignes, la quasi-totalité de l'azote qui va réagir pour former du NOx. Il est donc inutile de prendre en compte le débit d'air en sortie de la première ligne (lambda 1), qui est sur la flamme, d'où la meilleure interprétation avec le premier graphique.



A l'aide des deux graphiques ci-dessus, on observe que les concentrations de CO à l'intérieur de la chaudière ont tendance à diminuer lorsque le débit d'air augmente. En effet, les émissions de CO, qui diminuent lors d'une augmentation du débit d'air, ont lieu lorsque la combustion est incomplète. Si on produit beaucoup de CO, il continue de brûler dans la flamme ce qui correspond à l'orifice 1 (lambda 1). Néanmoins, il est plus simple de le constater sur le premier graphique. En effet, le CO est formé lors de la combustion du pellet mais une partie de ce CO va être amené à brûler à son passage au sein de la flamme. Il faut donc prendre le débit d'air total entrant dans la chaudière pour avoir une meilleure interprétation de l'évolution de la concentration de CO.

## 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous pouvons conclure sur notre travail réalisé que la combustion de biomasse est une source d'énergie renouvelable qui peut être une bonne alternative aux sources d'énergie fossiles qui s'épuisent.

Ce projet nous a permis, en premier lieu, d'approfondir nos connaissances concernant la combustion de la biomasse de manière générale. Nous nous sommes aussi intéressés à des aspects de la biomasse plus éloignés de notre sujet mais tout aussi importants. Dans un second temps, ce travail de groupe nous a donné l'opportunité de comprendre et d'analyser expérimentalement le processus de production d'énergie à partir de la combustion de la biomasse dans une chaudière domestique.

Par ailleurs, grâce à ce projet de physique, nous avons appris à travailler avec des personnes aux méthodes de travail différentes des nôtres. Ainsi, nous avons dû exposer nos idées et nos recherches devant notre groupe tout en étant à l'écoute de chacun et en respectant le point de vue des autres. Ces qualités essentielles nous aideront pour notre carrière d'ingénieur.

Malheureusement, avec les conditions sanitaires et le système de co-modalité, nous n'avons pas pu réaliser directement les prélèvements sur une chaudière. Malgré tout, notre professeur nous a fourni les données nécessaires pour l'analyser. Nous avons donc pu mener le projet à terme et nous tirons de cette expérience plusieurs aspects positifs.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

### Ensemble des sources des articles lus

- [1] M.Obaidullah, (2012), A review on Particle Emissions from Small Scale Biomass Combustion
- [2] Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010, 5). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89, 913–933. doi:10.1016/j.fuel.2009.10.022
- [3] Biomass Combustion Technology
- [4] Bern R.T. Simoneit, (2000), Biomass burning – a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion
- [5] Nunes, L. J., Matias, J. C., & Catalão, J. P. (2016, 1). Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 235–242. doi:10.1016/j.rser.2015.08.053
- [6] Hupa, M., Karlström, O., & Vainio, E. (2017). Biomass combustion technology development – It is all about chemical details. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36, 113–134. doi:10.1016/j.proci.2016.06.152
- [7] Anna Musialik-Piotrowska, Włodzimierz Kordylewski, Joanna Ciolek, Krzysztof Mościcki, (2010), Characteristics of air pollutants emitted from biomass combustion in small retort boiler, *Environment Protection Engineering*
- [8] Thomas Nussbaumer, (2003), Combustion and Co-combustion of Biomass : Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction, *Energy & Fuels*
- [9] Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 219–230. doi:10.1016/j.pecs.2003.10.004
- [10] Magdziarz, A., Wilk, M., & Straka, R. (2016, 7). Combustion process of torrefied wood biomass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127, 1339–1349. doi:10.1007/s10973-016-5731-0
- [11] Ryu, C., Yang, Y. B., Khor, A., Yates, N. E., Sharifi, V. N., & Swithenbank, J. (2006, 5). Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size. *Fuel*, 85, 1039–1046. doi:10.1016/j.fuel.2005.09.019
- [12] Wielgosiński, G., Łechtańska, P., & Namiecińska, O. (2017, 10). Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion. *Journal of the Energy Institute*, 90, 787–796. doi:10.1016/j.joei.2016.06.005
- [13] Tomasz HARDY, Anna MUSIALIK-PIOTROWSKA, Joanna CIOLEK, Krzysztof MOSCICKI, Włodzimierz KORDYLEWSKI, (2012), Negative effects of biomass combustion and co-combustion in boilers, *Environment Protection Engineering*
- [14] Johansson, L. S., Tullin, C., Leckner, B., & Sjövall, P. (2003, 10). Particle emissions from biomass combustion in small combustors. *Biomass and Bioenergy*, 25, 435–446. doi:10.1016/s0961-9534(03)00036-9
- [15] Demirbas, A. (2005, 1). Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31, 171–192. doi:10.1016/j.pecs.2005.02.002
- [16] Turetsky, M. R., Kane, E. S., Harden, J. W., Ottmar, R. D., Manies, K. L., Hoy, E., & Kasischke, E. S. (2010, 12). Recent acceleration of biomass burning and carbon losses in Alaskan forests and peatlands. *Nature Geoscience*, 4, 27–31. doi:10.1038/ngeo1027
- [17] Sjaak van Loo, Jaap Koppejan, (2008), The handbook of biomass combustion and co-firing
- [18] Glarborg, P. (2003, 2). Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems. *Progress in Energy and Combustion Science*. 29, 89-113. doi:10.1016/S0360-1285(02)00031-X

## Sources particulières pour des parties spécifiques

### Recherches - Lecture d'articles

#### Qu'est-ce que la biomasse ?

- [A] [https://www.youtube.com/watch?v=-O9\\_Yje0nmk](https://www.youtube.com/watch?v=-O9_Yje0nmk)
- [B] <https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/l-energie-biomasse-definition-fonctionnement-et-chiffres-cles>
- [C] [La biomasse : de l'organique à l'énergie | CallMePower.be](http://La%20biomasse%20:%20de%20l'organique%20%C3%A0%20l'%C3%A9nergie%20|%20CallMePower.be)
- [D] <https://explorers.mc2i.fr/la-biomasse-une-source-denergie-renouvelable-davenir>

#### Principe de la combustion

- [E] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Combustion>
- [F] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/matiere-combustion-3790/>

#### Transformation de la biomasse

- [G] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrolyse>
- [H] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz%C3%A9ification>
- [I] <https://gaz-tarif-reglemente.fr/gaz/comprendre-gaz-naturel/la-chaine-gaziere/methanisation-biomasse.html>

#### Impact sur l'environnement

- [J] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse>
- [K] <https://www.ecologie.gouv.fr/pollution-lair-origines-situation-et-impacts>
- [L] <https://www.poumon.ca/nouvelles/outils-de-plaidoyer/nos-%C3%A9nonc%C3%A9s-de-position/la-fum%C3%A9e-des-feux-de-bois>

### Expérimental

#### Matériel utilisé

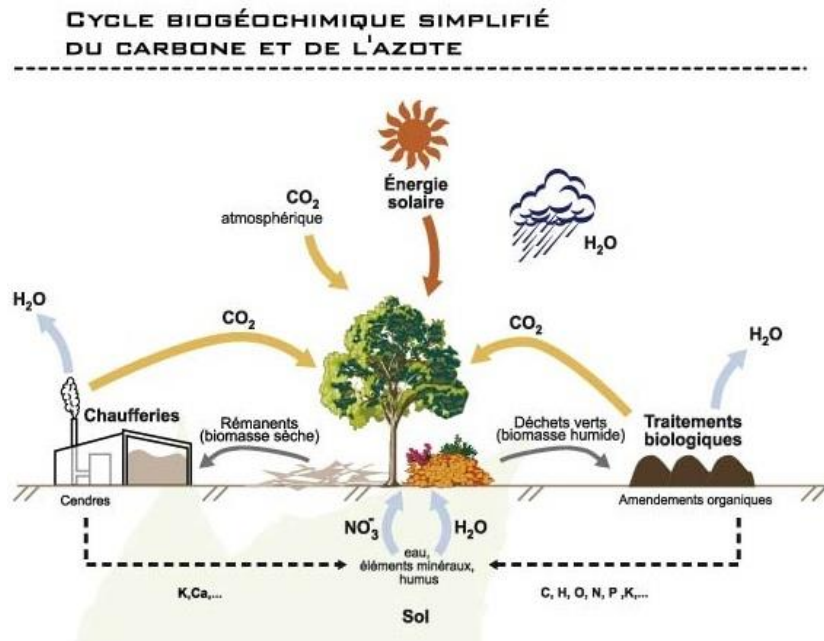
- [M] <https://www.testo.com/fr-BE/testo-350/p/0632-3511>
- [N] <http://www.addair.fr/product/analyseur-temps-reel-concentration-particules-a-l-emission-pps-m/>



## 6. ANNEXES

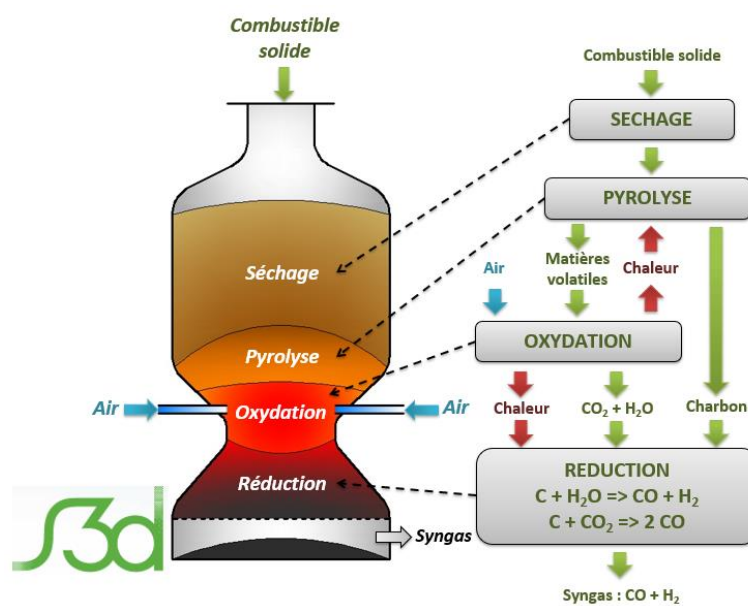
Annexe 1 : Cycle du carbone :

<https://www.biomasse-normandie.fr/encyclopedie/photosynthese-et-cycle-du-carbone/>



Annexe 2 : Principe de gazéification :

<https://www.gazeification.info/>



Annexe 3 : Composition de la biomasse et du charbon, cité dans l'article [4]

Physical, chemical and fuel properties of biomass and coal fuels

Property	Biomass	Coal
Fuel density (kg/m <sup>3</sup> )	~ 500	~ 1300
Particle size	~ 3 mm	~ 100 μm
C content (wt% of dry fuel)	42–54	65–85
O content (wt% of dry fuel)	35–45	2–15
S content (wt% of dry fuel)	Max 0.5	0.5–7.5
SiO <sub>2</sub> content (wt% of dry ash)	23–49	40–60
K <sub>2</sub> O content (wt% of dry ash)	4–48	2–6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content (wt% of dry ash)	2.4–9.5	15–25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content (wt% of dry ash)	1.5–8.5	8–18
Ignation temperature (K)	418–426	490–595
Peak temperature (K)	560–575	–
Friability	Low	High
Dry heating value (MJ/kg)	14–21	23–28

Annexe 4 : Etude des variations de NO, CO et TOC de biomasses et du charbon en fonction de la température, citée dans l'article [13]

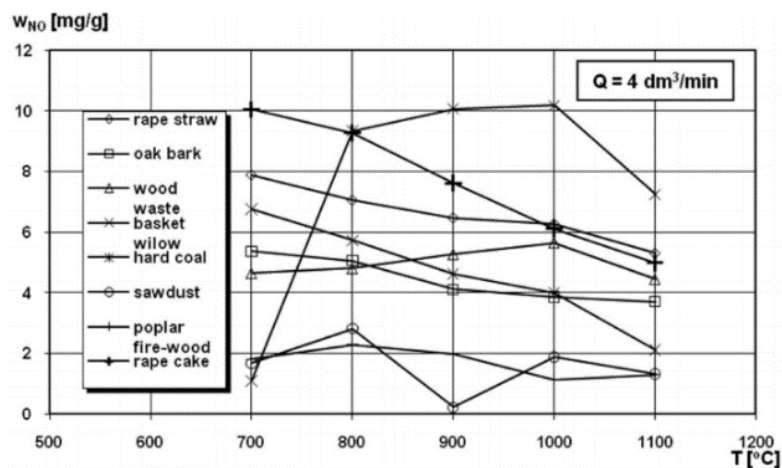


Fig. 9. Dependence of NO emission indicator on temperature for  $Q = 4.0 \text{ dm}^3/\text{min}$ .

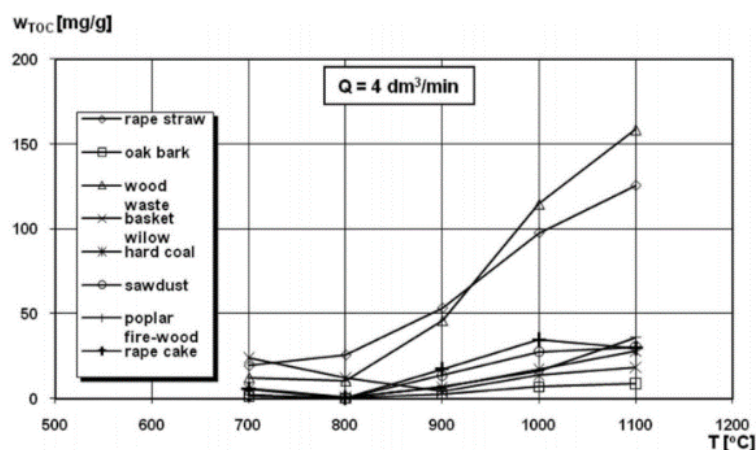


Fig. 12. Dependence of TOC emission indicator on temperature  $Q = 4.0 \text{ dm}^3/\text{min}$ .

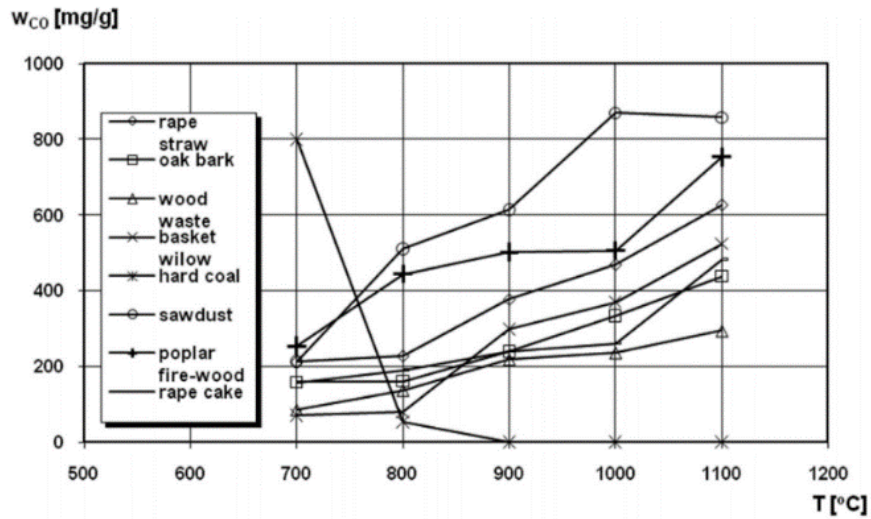


Fig. 6. Dependence of CO emission indicator on temperature for  $Q = 4.0 \text{ dm}^3/\text{min}$ .

Annexe 5 : Instrument de mesures physiques caractérisant les émissions de CO, NO et TOC, cité dans l'article [13]

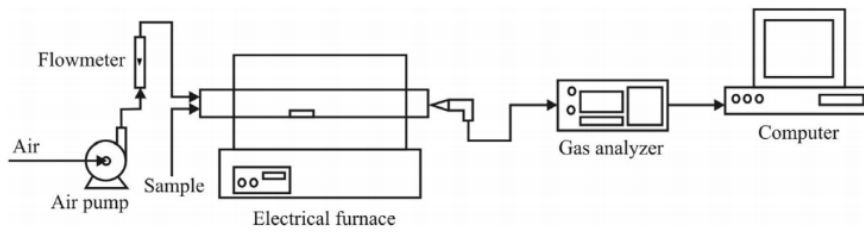


Fig. 1. Scheme of an experimental setup for the investigation of CO and NO emission.

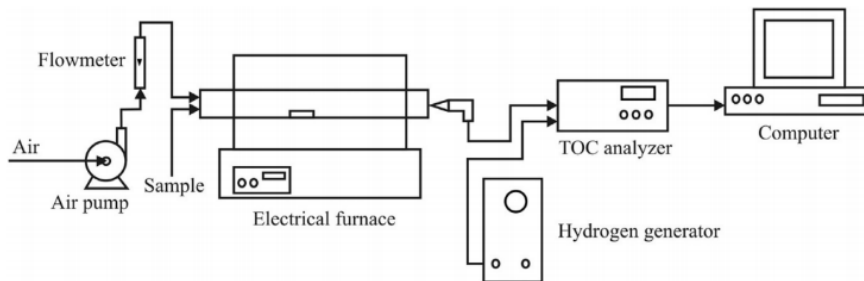
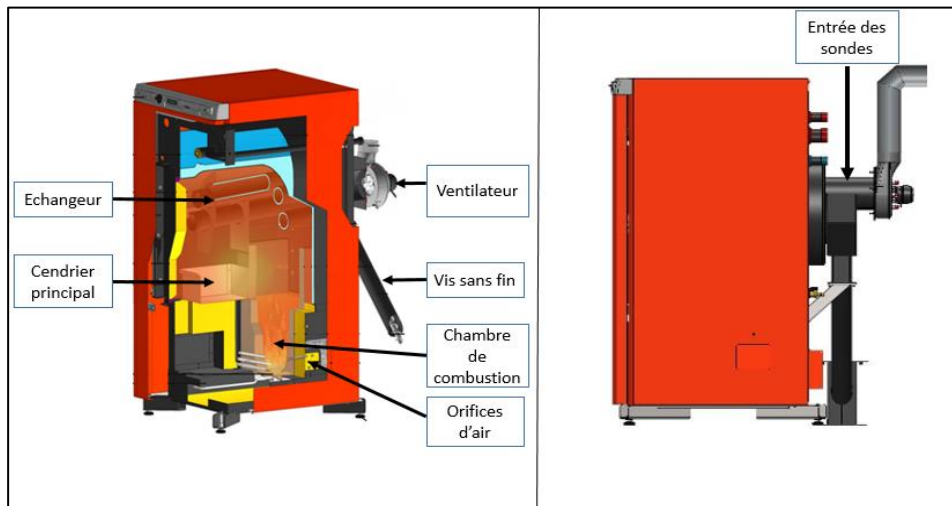
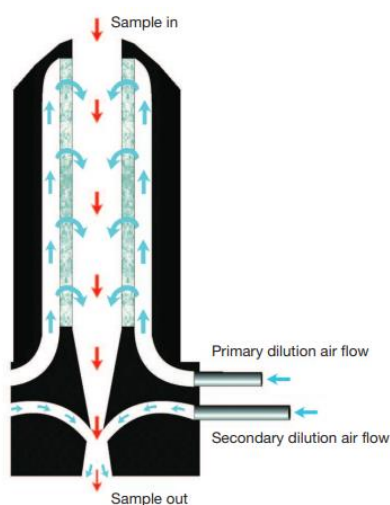


Fig. 2. Scheme of an experimental setup for the investigation of TOC emission.

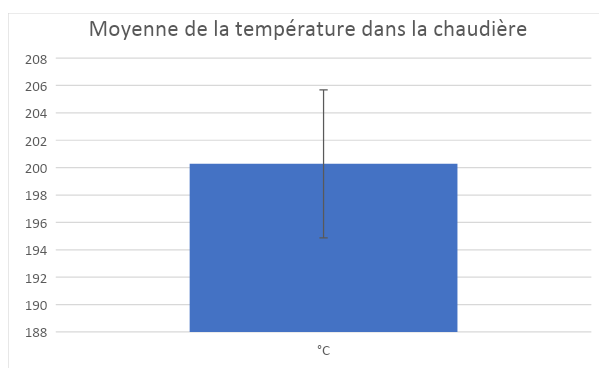
Annexe 6 : Chaudière domestique utilisée dans la partie expérimentale



## Annexe 7 : Schéma du fonctionnement d'un FPS



## Annexe 8 : Graphique de la moyenne de température dans la chaudière

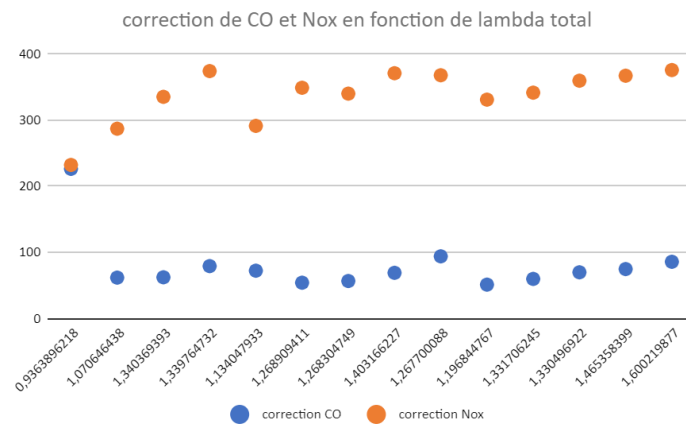
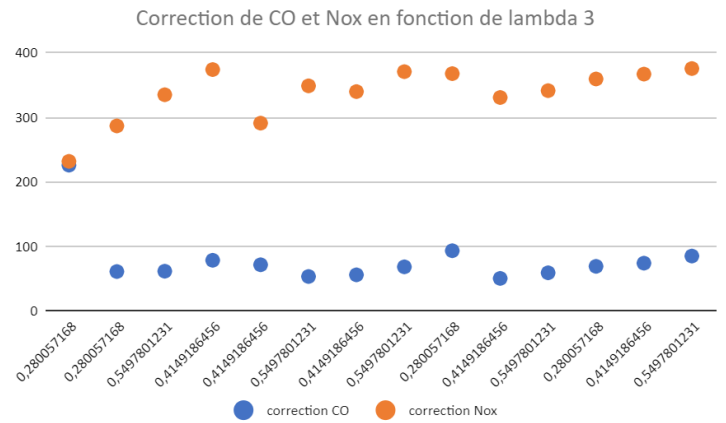
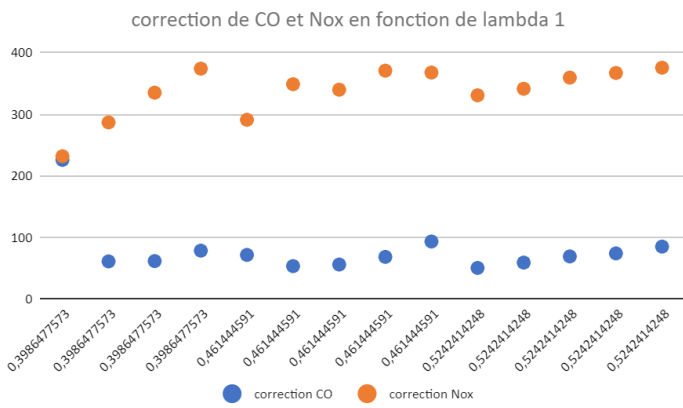


## Annexe 9 : Tableau regroupant les données calculées par le programme python

col1	col2	col3	lambdatotal	lambda 3	lambda 1	CO(ppm)	correction CO	ecart CO
2	1	1	0,9363896218	0,280057168	0,3986477573	453,9773585	226,0953436	765,0919572
2	2	1	1,070646438	0,280057168	0,3986477573	117,461126	61,60972329	120,1158275
2	2	3	1,340369393	0,5497801231	0,3986477573	108,6053849	62,11251856	23,94048373
2	3	2	1,339764732	0,4149186456	0,3986477573	126,1553552	79,01307135	27,53915058
2,5	1	2	1,134047933	0,4149186456	0,461444591	132,3690078	72,09102528	337,5891985
2,5	1	3	1,268909411	0,5497801231	0,461444591	90,28458498	53,93879286	16,51535516
2,5	2	2	1,268304749	0,4149186456	0,461444591	99,55712937	56,50356996	18,39610578
2,5	2	3	1,403166227	0,5497801231	0,461444591	114,3348189	68,86596779	26,99136119
2,5	3	1	1,267700088	0,280057168	0,461444591	150,017925	93,80140694	33,98039509
3	1	2	1,196844767	0,4149186456	0,5242414248	87,16666667	50,99744038	21,81042055
3	1	3	1,331706245	0,5497801231	0,5242414248	101,5748031	59,66093856	20,23582217
3	3	1	1,330496922	0,280057168	0,5242414248	113,6631579	69,64654283	26,0621163
3	3	2	1,465358399	0,4149186456	0,5242414248	122,0456274	74,54596126	26,60108438
3	3	3	1,600219877	0,5497801231	0,5242414248	134,6408141	85,57073052	31,34957142

interval CO	Nox (ppm)	correction Nox	ecart Nox	interval Nox	particule %	ecart particule	interval particule	O2 %
34,84901255	465,7606469	231,9638007	36,17671309	1,647805491	0,06515834081	0,0107748642	0,0002708241633	4,936781671
5,456415913	546,7565684	286,7801632	45,79521664	2,0803066	0,3480533159	0,01983450205	0,0004939676798	5,747715818
0,9631170777	585,6874211	334,9605624	52,4419456	2,109720671	0,5306301178	0,03175148584	0,0007966277318	7,011787968
1,244004361	596,9946978	373,9071128	49,01601199	2,214161708	0,5240291207	0,03083467759	0,0007737523063	8,226887593
15,63650741	534,4347826	291,0647444	48,25185268	2,234936589	0,4671666359	0,02688630328	0,0006685105324	6,31090301
2,048927129	583,6600791	348,6965146	57,51984592	7,136024119	0,5104744447	0,04660466685	0,001172267312	7,609328063
1,109757958	598,7488196	339,8194186	44,49754305	2,684345432	0,5583704356	0,03161022537	0,0007848318384	6,904305949
1,249840982	615,3910864	370,6613884	49,50241241	2,292220215	0,6386915989	0,0429265651	0,001084043988	7,717988858
1,553650669	587,9234112	367,6096915	49,23060503	2,250920339	0,4581881111	0,03803411954	0,0009596170393	8,205486149
7,484264799	565,2777778	330,7195385	96,6294788	33,15848978	0,5184532753	0,07132237598	0,001857006394	7,326111111
2,505481361	581,0787402	341,3021925	53,23578607	6,591344231	0,5486408099	0,02840469195	0,000707803776	7,379724409
5,337289628	586,4842105	359,3653251	65,50674745	13,41519928	0,5074180721	0,03856396783	0,0009882514903	7,944
3,235993065	600,6577947	366,8842027	52,74795516	6,416731539	0,5866793064	0,04054186357	0,001028097905	7,902509506
1,442419638	590,7530253	375,4520372	66,94627876	3,080253503	0,5406509449	0,04770714555	0,001179018765	8,412442244

## Annexe 10 : Graphiques des concentrations de CO et NOx



## Annexe 11 : Illustration de présentation du rapport

[https://0501.nccdn.net/4\\_2/000/000/01e/20c/silvatherm-compact-documentation.pdf](https://0501.nccdn.net/4_2/000/000/01e/20c/silvatherm-compact-documentation.pdf)

