UCLouvain

epl

École polytechnique de Louvain

Étude de la combustion des boues de barattage dans l'industrie de karité en Afrique de l'Ouest

Conception et expérimentation d'un prototype

Auteur: **Lara Lejeune**
Promoteur: **Hervé Jeanmart**
Lecteurs: **Arnaud Rouanet, Benoit Herman, Haddy Mbuyi Katshiatshia**
Année académique 2022–2023
Master [120] : ingénieur civil mécanicien

Résumé

Ce travail de fin d'études vise à *étudier la combustion des boues de barattage dans l'industrie du karité en Afrique de l'Ouest afin de fournir des recommandations dimensionnelles et opérationnelles pour la conception d'un brûleur* sur place. Dans le cadre du projet Biostar pour la transition énergétique en Afrique, le brûleur doit répondre aux besoins spécifiques des petites et moyennes entreprises de la filière karité. L'objectif est de remplacer le bois utilisé dans le processus de torréfaction et de cuisson des amandes de karité par des boues de barattage, un sous-produit de la fabrication du beurre de karité.

Les concepts théoriques utiles dans l'élaboration de ce brûleur sont liés à la composition de la biomasse (humidité, pouvoir calorifique, composition chimique) et aux différentes étapes de la combustion complète (séchage, pyrolyse, combustion primaire et secondaire). Pour maîtriser ces concepts, il est nécessaire d'analyser l'influence de facteurs spécifiques tels que la puissance combustible, l'excès d'air, les émissions de monoxyde de carbone, le tirage naturel, les débits d'airs primaires et totaux, ainsi que les valeurs typiques associées.

Afin de comprendre au mieux le phénomène de la combustion, un brûleur asymétrique d'une puissance théorique de 10 kW a été conçu pour l'expérimentation. Pour cela, il est nécessaire de caractériser la biomasse utilisée, d'émettre des hypothèses quant à son dimensionnement et de planifier les expérimentations de manière stratégique.

Les mesures et observations faites lors de l'expérimentation sur le prototype permettront d'émettre des recommandations quant à la conception d'un brûleur similaire, à grande échelle. Dans ce travail, la partie qualitative est plus prépondérante que la partie quantitative. Étant donné le grand nombre de facteurs en jeu, il a été complexe d'établir des corrélations claires entre les différents paramètres mesurés. Cependant, cette diversité dans les facteurs testés a permis de déterminer leur impact positif, négatif ou neutre sur la combustion. Lors des phases stables, les émissions de monoxyde de carbone étaient bien inférieures à 4000 ppm, mais les puissances étaient trop élevées (atteignant jusqu'à 15 kW de puissance combustible).

Le prototype expérimental conçu dans ce travail permet donc une combustion adéquate de la biomasse, mais un optimum n'a pas encore été atteint. Des pistes de réflexion concernant l'enjeu de l'écoulement de la biomasse et la gestion des problèmes d'étanchéité à l'air dans le réservoir seront abordées dans la partie discussion.

Mots clés :
biomasse, boue, combustion, conception, déchet, essais, karité, optimisation

Abstract

The aim of this thesis is to study the combustion of churning sludge in the West African shea industry, in order to provide dimensional and operational recommendations for the design of an on-site burner. As part of the Biostar project for energy transition in Africa, the burner is designed to meet the specific needs of small and medium-sized enterprises in the shea industry. The aim is to replace the wood used in the shea kernel roasting and cooking process with churning sludge, a by-product of shea butter production.

The theoretical concepts involved in developing this burner relate to biomass composition (moisture, calorific value, chemical composition) and the various stages of complete combustion (drying, pyrolysis, primary and secondary combustion). To master these concepts, it is necessary to analyze the influence of specific factors such as fuel power, excess air, carbon monoxide emissions, natural draft, primary and total airflows, and the associated typical values.

In order to gain a better understanding of the combustion process, an asymmetrical burner with a theoretical output of 10 kW was designed for the experiment. For this, it is necessary to characterize the biomass used, make assumptions about its sizing and plan the experiments strategically.

The measurements and observations made during experimentation on the prototype will enable us to make recommendations for the design of a similar burner on a larger scale. In this work, the qualitative part is more preponderant than the quantitative. Given the large number of factors involved, it was difficult to establish clear correlations between the various parameters measured. However, this diversity in the factors tested enabled us to determine their positive, negative or neutral impact on combustion. During stable phases, carbon monoxide emissions were well below 4000 ppm, but power levels were too high (up to 15 kW fuel power).

The experimental prototype designed in this work therefore enables adequate biomass combustion, but an optimum has not yet been achieved. In the discussion section, we'll be taking a closer look at the issue of biomass flow and the management of air-tightness problems in the tank.

Translation : [5]

Key words :
biomass, sludge, combustion, design, waste, experiments, shea butter, optimisation

Table des matières

Remerciements i

Liste des notations ii

Liste des figures iii

Liste des tableaux vi

1 Introduction générale 1
- 1.1 Le projet BioStar . . . 1
- 1.2 La filière karité . . . 2
- 1.3 Enjeu environnemental . . . 3
- 1.4 Enjeu technologique . . . 4

2 État de l'art 6
- 2.1 Combustible : caractérisation de la biomasse solide . . . 6
  - 2.1.1 Composition physique : analyse sommaire . . . 7
  - 2.1.2 Composition chimique : analyse élémentaire . . . 8
  - 2.1.3 Le pouvoir calorifique . . . 8
  - 2.1.4 Granulométrie, densité et écoulement, . . . 10
- 2.2 Combustion : caractérisation de la combustion complète . . . 12
  - 2.2.1 Le séchage et la pyrolyse . . . 13
  - 2.2.2 La combustion primaire . . . 13
  - 2.2.3 La combustion secondaire . . . 14
  - 2.2.4 Polluants : origine et impacts . . . 14
  - 2.2.5 L'excès d'air . . . 15
  - 2.2.6 Distribution de l'air . . . 16
  - 2.2.7 Le tirage . . . 16
- 2.3 Conception : description des brûleurs à petite échelle . . . 18
  - 2.3.1 Le foyer "trois pierres" traditionnel et amélioré . . . 18
  - 2.3.2 Foyers métalliques avec du bois . . . 18
  - 2.3.3 Foyers améliorés avec de la balle de riz . . . 19
  - 2.3.4 Foyers optimisés avec des pellets . . . 19

3 Matériel et méthodes 20
- 3.1 Caractérisation des boues de karité . . . 20
  - 3.1.1 Analyse sommaire et élémentaire . . . 20
  - 3.1.2 Granulométrie, densité apparente et écoulement . . . 22
- 3.2 Dimensionnement prototype . . . 24

3.2.1 Combustion complète des boues : dimensions des conduits d'air primaire et secondaire . . . 24
3.2.2 Tirage naturel : dimensions de la cheminée . . . 27
3.2.3 Alimentation des boues en continu : dimensions de la grille, du réservoir et du cendrier . . . 28
3.2.4 Contrôle de la combustion : instrumentations et équipements spécifiques . . . 29
3.2.5 Vue d'ensemble du prototype dimensionné . . . 33
3.3 Planification expérimentale . . . 34
3.3.1 Les facteurs . . . 34
3.3.2 Les réponses . . . 36

4 Résultats et discussion **37**
4.1 Exploration qualitative du comportement du brûleur . . . 37
4.2 Analyse quantitative des essais réussis . . . 40
4.3 Réflexions pour un plus grand brûleur . . . 40

5 Conclusions et perspectives **44**

Bibliographie **48**

A Détails de l'analyse des boues de karité **49**
A.1 Caractérisation des boues de karité faites par le Cirad . . . 49
A.2 Caractérisation des boues de karité faites au laboratoire . . . 49

B Détails sur le design du prototype **52**
B.1 Tableaux récapitulatifs des dimensions du brûleur prototype . . . 52
B.2 Référence des outils de mesure utilisés . . . 52
B.3 Photos du prototype . . . 52

C Plans SolidWorks du prototype **54**

D Analyse de risque **57**

E Détails sur les essais sur le prototype **58**
E.1 Plan initial des essais en laboratoire . . . 58
E.2 Moyennes calculées sur base des résultats du laboratoire . . . 58
E.2.1 Essais préliminaires . . . 58
E.2.2 Essais pour le test des paramètres de design . . . 59
E.3 Résultats obtenus en laboratoire . . . 59
E.3.1 Essai 3 , 17 février . . . 59
E.3.2 Essai 4 , 23 février . . . 59
E.3.3 Essai 5 , 03 mars . . . 59
E.3.4 Essai 6 , 16 mars . . . 59
E.3.5 Essai 7 , 29 mars . . . 59
E.3.6 Essai 8, 07 avril . . . 59
E.3.7 Essai 9, 21 avril . . . 59
E.3.8 Essai 10, 19 mai . . . 59

Remerciements

Je tiens à remercier spécialement mon promoteur, Hervé Jeanmart, et Arnaud Rouanet, pour le temps qu'ils ont consacré à m'aider dans mon travail. Leur soutien, leurs conseils et le partage de leur précieuse expertise ont été d'une importance capitale pour la réussite de ce projet. Mes remerciements vont également aux techniciens du laboratoire Credem pour leur accueil chaleureux et leurs conseils avisés, même dans les conditions difficiles du froid de l'hiver. Leur disponibilité et leur contribution ont grandement facilité mes recherches et expérimentations.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers mes parents, qui m'ont toujours soutenu avec un amour inconditionnel. À ma maman, qui malgré son aversion pour les sciences techniques, a relu attentivement mon travail et m'a apporté un soutien précieux dans les moments de doute. À mon papa et ma petite sœur, pour leurs encouragements constants tout au long de cette aventure.

Je tiens à remercier mes amies de Louvain et de Huy, qui ont été un pilier tout au long de ces années. Leur présence et leurs encouragements m'ont donné la force de persévérer et d'aller de l'avant. Un grand merci à ma cousine Alice, qui a généreusement offert son aide pour détourer les photos des vues du prototype. Son amitié indéfectible et sa contribution ont été d'une aide inestimable.

Enfin, j'ai la chance et l'immense privilège de pouvoir dire un immense merci à mes deux grands-mères. À ma mamy Rolande, qui m'a inculqué la rigueur et le courage nécessaires pour atteindre mes objectifs. À ma mamy Anne, qui a toujours été présente dans ma vie et m'a montré que tout était possible avec peu de ressources, que la détermination et la créativité étaient les clés pour surmonter les obstacles. Leur sagesse, leurs enseignements et leur amour ont été des sources d'inspiration et de motivation constantes tout au long de ce parcours. Je leur suis profondément reconnaissant pour tout ce qu'elles m'ont apporté.

En somme, je tiens à exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Leur soutien inestimable a été un véritable moteur dans la concrétisation de ce projet.

Merci du fond du cœur pour ces sept années qui touchent à leur fin.

"La vie, en effet, est comme le bleu de travail qu'on doit enfiler chaque matin, pour faire du jour qui se lève l'occasion de belles choses."

Martin Steffens,
La vie en bleu.

Liste des notations

Abréviations

(Cirad) Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

(ppm) Partie par milion

Grandeurs chimiques

M_C	Masse molaire du carbone	$1.2\,\mathrm{kg\,kmol^{-1}}$
M_{H_2O}	Masse molaire de l'eau	$1.8\,\mathrm{kg\,kmol^{-1}}$
M_H	Masse molaire de l'hydrogène	$1\,\mathrm{kg\,kmol^{-1}}$
M_N	Masse molaire de l'azote	$1.4\,\mathrm{kg\,kmol^{-1}}$
M_O	Masse molaire de l'oxygène	$1.6\,\mathrm{kg\,kmol^{-1}}$
M_S	Masse molaire du souffre	$3.2\,\mathrm{kg\,kmol^{-1}}$

Indices

ar	As Received, masse brute
daf	Dry Ashes Free, masse sèche et sans cendre
d	Dry, masse sèche

Grandeurs physiques

$\dot{Q}$	Débit volumique	$\mathrm{m^3}$
(A)	Ashes, cendres	%
(FC)	Fixed Carbon, carbone fixe	%
$\dot{m}$	Débit massique	$\mathrm{kg\,h^{-1}}$
(M)	Moisture, humidité	%
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur	$\mathrm{kJ\,kg^{-1}}$
P	Puissance	kW
(VM)	Volatile Matter, matière volatile	%
p	Pression	Pa
T	Température	°C

Liste des figures

1.1 Représentation des différentes filières du projet Biostar et leurs déchets associés, utilisés pour produire de l'énergie. [1] 1
1.2 Illustration des besoins énergétiques identifiés par l'audit de la filière karité de l'unité ABASFE (foyers au feu de bois) [9] 2
1.3 Illustrations de la torréfaction et de la cuisson dans les différentes PME de production de beurre de karité au Bukina Fasso (Audits faits en 2022) . . 3
1.4 Illustration des enjeux technologiques, liés à la combustion des boues de barattage 5

2.1 Liste des principales variables et leurs influences sur les autres variables dans la recherche d'un optimum de combustion en termes d'émission de polluants, de masse de combustible et échange de température. 6
2.2 Paramètres mesurés, à droite, avec l'analyse sommaire, de haut en bas : le taux d'humidité (base brute, ar), de cendres (base sèche d), de matière volatile et de carbone fixe (base sèche et sans cendre, daf). Et, à gauche, avec l'analyse élémentaire, de haut en bas : le taux de sulfure, d'azote, d'oxygène, d'hydrogène et de carbone. [20] 7
2.3 Représentation de l'effet de la composition chimique des combustibles solides : biomasse standard, tourbe, lignine, charbon, anthracite, par rapport au combustible liquide (pétrole) et gazeux (méthane) qui ne contiennent pas d'oxygène. Un faible ratio de O/C, et un haut ratio H/C augmente le pourvoir calorifique [15] 10
2.4 Différents mécanismes d'alimentation en continu de la biomasse dans les brûleurs à grande échelle. (a) par le dessous ; (b) horizontalement ; (c) par le dessus [7] 11
2.5 Les différentes technologies de conversion thermochimiques de la biomasse : le séchage, la pyrolyse, la combustion primaire et la combustion secondaire 12
2.6 Rendement massique global de la pyrolyse du bois de hêtre à différentes températures entre 450 et 1050 °C [13]. $\%w = \%_a r$ 13
2.7 Propagation des fronts de conversion et d'allumage dans un lit fixe remplit de biomasse [24]. $T_{dry} = T_{sec}$, $T_{char} = T_{carb}$ 14
2.8 Moyenne des émissions en $mg/m^3_{0°C}$ à 13 % O_2 pour des applications de combustion de biomasse à petite échelle. [15]. La conversion des émissions de CO en ppm donne : 3989, 2661, 2205, 250, 750 (de haut en bas). 15
2.10 Brûleur à balle de riz 19

3.1 Échantillon des boues présentes au laboratoire de l'UCLouvain 20

3.2 Setup de mesure de l'humidité des boues de barattage. À droite le four pré-chauffé avec les échantillons à l'intérieur. À gauche, les échantillons de calibres aléatoires. . . . 21
3.3 Comparaison entre la composition chimique des boues de barattage et celle d'autres biomasses solides : les boues de barattage . . . 22
3.4 Répartition de la granulométrie des boues après être passé dans les tamis . 23
3.5 Mesure de densité : peser la masse de densité inconnue dans le même volume qu'une masse de densité connue ($\rho_{eau} = 1000$ kg/m^3) . . . 23
3.6 Maquette du réservoir et de la grille pour la conception du prototype . . . 24
3.7 Les différentes parties du prototype à dimensionner : les conduites d'air primaire et secondaire, la cheminée, la grille, le réservoir, le cendrier . . . 25
3.8 Illustration des dimensions liées à l'air primaire . . . 26
3.9 Illustration des dimensions liées à l'air secondaire . . . 26
3.10 Illustration des dimensions liées à la cheminée . . . 27
3.11 Illustrations des dimensions de la grille . . . 28
3.12 Illustration des dimensions du réservoir . . . 28
3.13 Illustration des dimensions du cendrier . . . 29
3.14 Photos des appareils de mesure LabView représenté sur le P&ID. . . . 30
3.15 Bac de boues (1 par essais) . . . 30
3.16 P&ID du prototype Piquages pour les températures T1O1A, T102A, T102A 31
3.17 Photos de quelques équipements de gestion opérationnelle . . . 32
3.18 Photos de quelques équipements de gestion opérationnelle . . . 33
3.19 Vue d'ensemble du prototype final. Modélisation vs réalité. . . . 34

4.1 Illustration des adaptations du dimensionnement du brûleur . . . 38
4.2 Mesure de la température dans le brûleur . . . 38
4.3 Puissances combustibles en fonction de l'ouverture du réservoir et du débit total d'air avec $\alpha_g = 30°$, $d_g = 5mm$ et $h_{ouv} = 80mm$ . . . 39
4.4 Mesure des émissions de CO avec $\alpha_g = 30°$, $d_g = 5mm$ et $h_{ouv} = 80mm$ . . 39
4.5 Dépression à travers le lit de biomasse en fonction de l'inclinaison de la grille et du débit d'air primaire . . . 40
4.6 . . . 41
4.7 Émission de CO en fonction de lambda . . . 42
4.8 Puissances combustible en fonction du débit d'air total et de lambda . . . 42
4.9 Puissances combustible en fonction du débit d'air primaire et de lambda . 43

A.1 Analyse élémentaire des boues de karité faite par le Cirad [3] . . . 51

E.1 Moyennes de l'excès d'air . . . 58
E.2 Moyennes des températures . . . 63
E.3 Moyennes des pressions . . . 63
E.4 Moyennes des débits . . . 63
E.5 Moyennes des puissances . . . 64
E.6 Moyennes des émissions de CO . . . 64
E.7 Moyennes de l'excès d'air . . . 65
E.8 Moyennes des températures . . . 65
E.9 Moyennes des pressions . . . 66
E.10 Moyennes des débits . . . 66
E.11 Données LabView de l'essai 3 . . . 67

E.12 Données Testo de l'essai 4 68
E.13 Données LabView de l'essai 4 69
E.14 Données Testo de l'essai 5 70
E.15 Données LabView de l'essai 5 71
E.16 Données Testo de l'essai 6 72
E.17 Données LabView de l'essai 6 73
E.18 Données Testo de l'essai 7 74
E.19 Données LabView de l'essai 7 75
E.20 Données Testo de l'essai 8 76
E.21 Données LabView l'essai 8 77
E.22 Données Testo de l'essai 9 78
E.23 Données LabView de l'essai 9 79
E.24 Données Testo de l'essai 10 80
E.25 Données LabView de l'essai 10 81

Liste des tableaux

3.1 Matrice d'expériences du prototype avec les valeurs réelles des facteurs testés. En brun, les facteurs liés au lit de biomasse. En rouge, les facteurs liés aux flux d'airs. 35

A.1 Callibration des boues de karité faite par le Cirad [3] 49
A.2 Caractérisation des boues de karité disponible au laboratoire Credem (novembre 2021 50
A.3 Table des mesure d'humidité faire au laboratoire 50

B.1 Répertoire des outil utilisé sur le prototype expérimental 53

E.1 Matrice d'expériences du prototype 61
E.2 Résumé des moyennes de tous les essais 62

Chapitre 1

Introduction générale

Ce travail de fin d'études porte sur la combustion des boues de barattage de karité. Il a pour objectif afin d'apporter des recommandations dimensionnelles et opérationnelles quant à la conception d'un brûleur sur place, dans les PME de production de beurre de karité en Afrique de l'Ouest. Ce brûleur à taille réelle sera réalisé dans un cadre plus général qui est le projet Biostar.

1.1 Le projet BioStar

Le projet Biostar est un projet sur 5 ans (de 2020 à 2025) dont la but est de participer à la transition énergétique de PME en Afrique de l'Ouest. Ce projet est financé par l'Union Européenne et l'Agence Française de Développement. Il fait l'objet de nombreux partenariats, pour la coordination (le Cirad), au Burkina Fasso (2IE, IRSAT, UTS), au Sénégal (IRSA, UGB), et en Europe (UHOH, UCLouvain, UNIROMA3, NITIDAE).

L'objectif est d'utiliser les déchets agro-alimentaires générée par les industries afin d'accroître l'accès à l'énergie en zone rurale. En effet, la biomasse résiduelle peut être transformée énergie sous forme de chaleur, de force motrice ou d'électricité. Concrètement, le projet prévoit d'implanter des procédés de bioénergie au sein de PME de cinq filières agro-alimentaires différentes : anarcade, arachide, karité, mangue et riz ; au Burkina Faso et au Sénégal. Ces filières ont été choisies pour leur importance économique dans les pays concernés, les stratégies de développement durable dont elles font l'objet et pour l'implication importante des femmes dans ces industries [1].

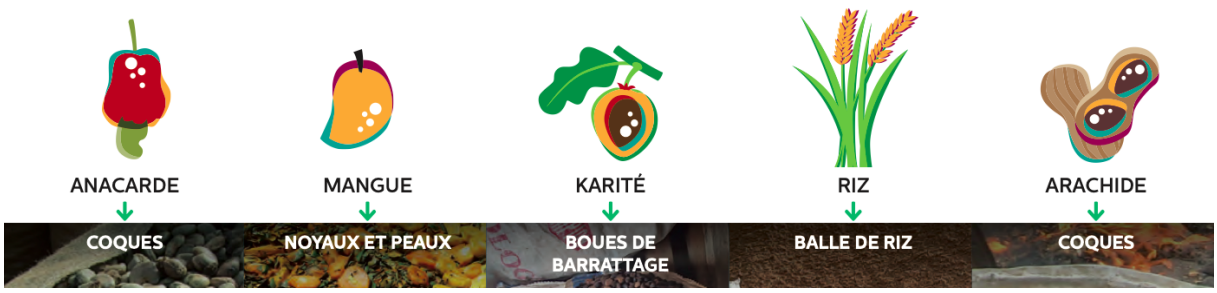
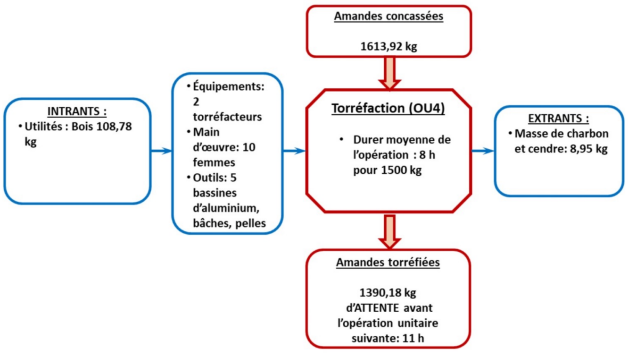


FIGURE 1.1 – Représentation des différentes filières du projet Biostar et leurs déchets associés, utilisés pour produire de l'énergie. [1]

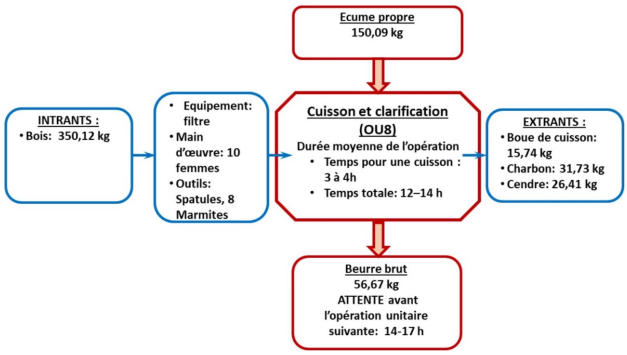
Durant la première phase du projet, des audits ont été réalisés au sein de chaque PME de chaque filière afin d'étudier leurs besoins énergétiques, les résidus agro-alimentaires disponibles sur place, la faisabilité et la technologie nécessaire pour la transformation en bioénergie. La figure 1.1 représentées les filières du projet et les déchets associés sélectionnés pour en faire des bioénergies.

1.2 La filière karité

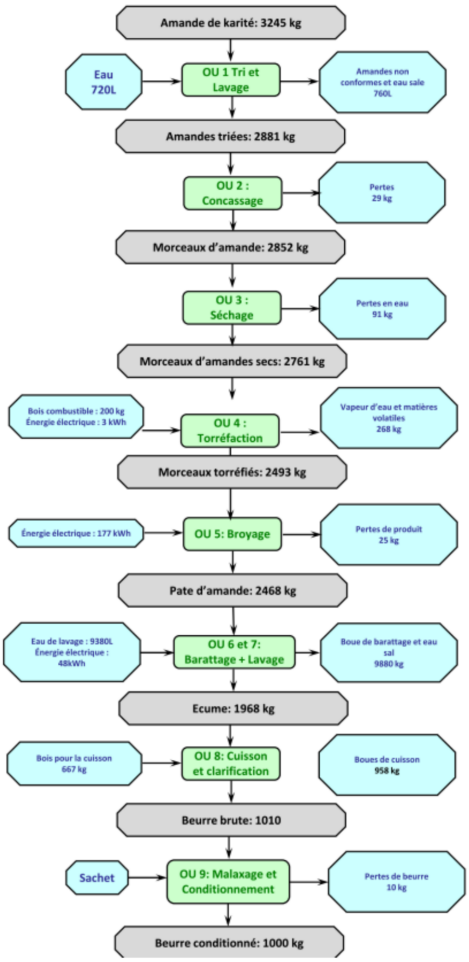
En ce qui concerne la filière karité, l'objectif est de concevoir un brûleur capable de produire de la chaleur avec les boues de barattage, amandes de karité après extraction de l'huile, en respectant les besoins énergétiques des PME. Les Figures 1.2a et 1.2b illustre les besoins énergétiques identifiés par l'audit sur la PME.



(a) Besoin énergétique pour l'étape de torréfaction



(b) Besoin énergétique pour l'étape de cuisson



(c) Étapes de transformation des amandes

FIGURE 1.2 – Illustration des besoins énergétiques identifiés par l'audit de la filière karité de l'unité ABASFE (foyers au feu de bois) [9]

La production de beurre de karité, consiste en une série d'étapes demandant un apport énergétique, mais qui sont nécessaires à l'extraction de l'huile contenue dans les amandes pour en faire du beurre (huile solide à température ambiante), comme illustré par la figure 1.2c. Parmi celles-ci, deux procédés demandent un apport de chaleur : la torréfaction des

amandes de karité et la cuisson du beurre de barattage. La Figure 1.3 montre comment les PME du Burkina-Faso utilisent la combustion dans ces deux applications (cuisson et torréfaction). À présent, cette énergie thermique est apportée par la combustion de bois (issus de la déforestation) ou butane (énergie fossile). Seule l'unité ASY utilise déjà des boues mélangées avec le bois dans le processus de torréfaction. Pourtant, l'audit effectué dans l'unité RPBHC estime que l'énergie contenue dans les déchets produits par la transformation des amandes est 10 fois supérieure au besoin en chaleur de la torréfaction et de la cuisson réunie.

(a) Torréfaction au gaz (b) Torréfaction au feu de bois (c) Cuisson au feu de bois

FIGURE 1.3 – Illustrations de la torréfaction et de la cuisson dans les différentes PME de production de beurre de karité au Bukina Fasso (Audits faits en 2022)

L'étude de la combustion de boues de barattage s'insère dans la deuxième phase (après la phase d'audits), qui est la conception de prototypes, car les PME ne maîtrisent pas encore la combustion complète de la biomasse. En effet, dans les audits réalisés, on observe de grosses variations des besoins en puissance liées au manque de maîtrise de la combustion. L'utilisation du butane demanderait une puissance de combustion estimée entre 7 à 20 kW et celle du bois entre 50 à 170 kW [12, 11, 9, 10].

1.3 Enjeu environnemental

Dans les territoires ruraux d'Afrique de l'Ouest, l'accès à l'énergie est à la fois coûteux et peu fiable, ce qui renforce malheureusement l'utilisation d'énergies fossiles et le recours au bois provenant de la déforestation. Cette situation s'inscrit dans un contexte plus large de déforestation, qui est une pratique non durable de l'utilisation des ressources renouvelables. Ceci constitue un enjeu critique, bien avant même les préoccupations liées au changement climatique.

© J. Blin - Cirad [2]

Ces difficultés d'approvisionnement énergétique en zone rurale obligent les PME agroalimentaires à se déplacer vers les milieux péri-urbains. Cette migration vers les zones plus proches des centres urbains a pour conséquence de dévitaliser les zones rurales, et d'augmenter la densité urbaine. Ce phénomène entraîne également une augmentation considérable des coûts de transport de la matière première qui se traduit par des pertes

énergétiques, une perte de biomasse précieuse et une perte de temps significative. De plus, l'accumulation de déchets organiques près des villes peut provoquer un risque sanitaire pour les populations locales.

La valorisation les déchets de biomasse, en les transformant en sources d'énergie, a pour avantage de renforcer à la fois la sécurité énergétique et d'ouvrir la voie au développement de nouvelles PME agroalimentaires dans les zones rurales, au plus près des productions agricoles, même dans les zones mal desservies par les réseaux d'approvisionnement énergétique actuels.

En outre, promouvoir le développement des bioénergies au sein des PME en Afrique de l'Ouest, permet de réduire la dépendance aux énergies fossiles, mais également de favoriser la circularité des ressources. Par exemple, les boues de karité, peuvent être utilisées dans un cycle court, sachant que le karité repousse chaque année. Contrairement au bois cette ressource est inépuisable.

En somme, en exploitant une ressource renouvelable, comme les déchets de biomasse, cela permettra de réduire la dépendance énergétique des PME, de préserver les ressources naturelles, de revitaliser les territoires ruraux et d'encourager le développement économique équilibré entre les zones rurales et urbaines.

1.4 Enjeu technologique

Pour fermer la boucle et assurer une transition énergétique réussie pour les PME agro-alimentaires, il est essentiel de répondre aux besoins en innovation et de renforcer les capacités technologiques. Dans de nombreuses PME agroalimentaires, la transformation des produits est souvent inefficace sur le plan énergétique, ce qui peut entraîner une baisse de la qualité des produits et des pertes importantes.

Dans cet ordre d'idée, l'unité RPBHC a mis en place un projet pour produire des briquettes de charbon de boues de barattage mais le coût de production n'était pas compétitif avec celui du charbon de bois. La principale cause de son prix élevé étant la maintenance : 6 personnes devaient être mobilisées. Par ailleurs, Le carbonisateur (visible à la Figure 1.4a) et la presse à briquettes sont toujours présents sur le site.

Il est primordial de résoudre les problèmes liés à la combustion des boues, qui peuvent produire des fumées désagréables et acides en raison de la présence d'huile, illustré à la Figure 1.4b. Assurer une combustion efficace et respectueuse de l'environnement constitue un enjeu important, tant pour la qualité des produits que pour la santé des travailleurs et des populations environnantes.

En investissant dans l'innovation technologique et en renforçant les compétences des acteurs du secteur, cela permettra d'améliorer l'efficacité énergétique des procédés de transformation agro-alimentaires, de réduire les pertes, d'optimiser la qualité des produits et de préserver la santé des populations.

(a) Carbonisateur de boues de karité à l'essai dans l'unité RPBHC

(b) Fumées de pyrolyses très odorantes lors de la combustion incomplète des boues de karité (photo prise en laboratoire, mars 2023)

FIGURE 1.4 – Illustration des enjeux technologiques, liés à la combustion des boues de barattage

Chapitre 2

État de l'art

La combustion de la biomasse est un procédé qui implique de nombreux aspects physico-chimiques complexes. Malgré le fait que ce procédé soit connu depuis des millénaires, la quantité de variables ayant de l'influence sur ses émissions et ses performances, font de la combustion un procédé difficile à prédire de manière précise. Les brûleurs à petite échelle, dans lesquels l'inertie est plus faible, sont encore plus affectés par le changement de ces variables. La Figure 2.1 donne une vue d'ensemble de la complexité et la synergie des variables principales de la combustion de biomasse.

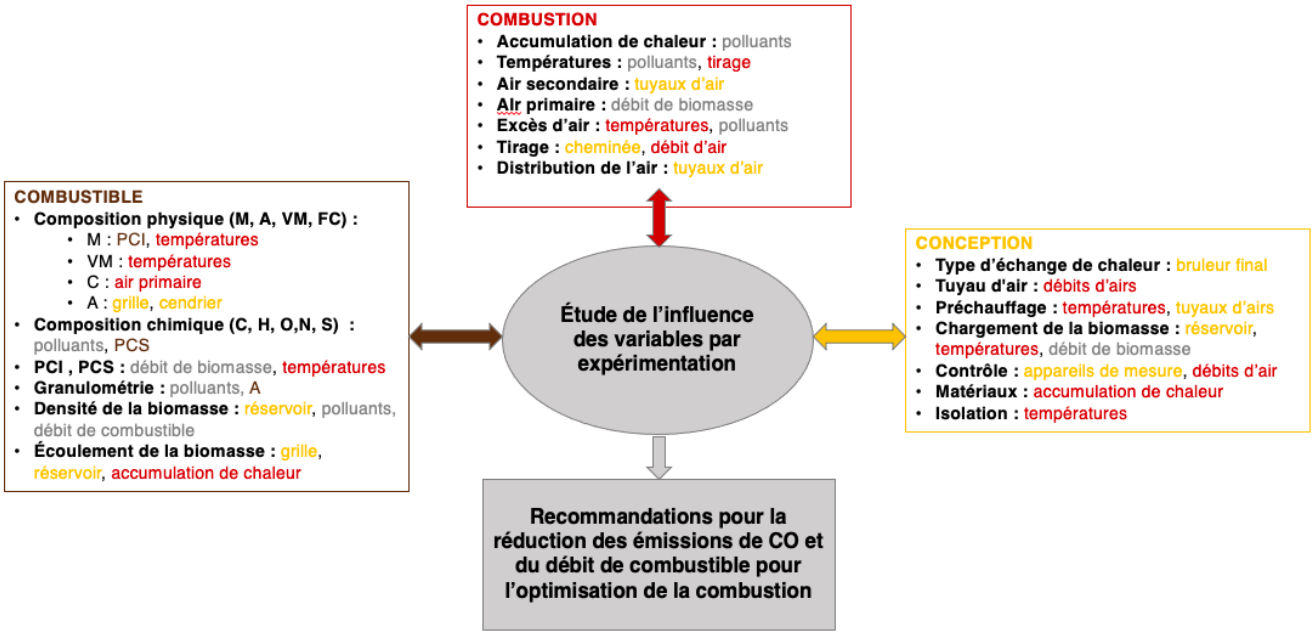


FIGURE 2.1 – Liste des principales variables et leurs influences sur les autres variables dans la recherche d'un optimum de combustion en termes d'émission de polluants, de masse de combustible et échange de température.

2.1 Combustible : caractérisation de la biomasse solide

Contrairement aux combustibles liquides ou gazeux, la biomasse solide est difficile à caractériser précisément. En effet, la biomasse est constituée de structures complexes,

difficiles à modéliser issues de la photosynthèse, mais aussi, dans le cas de la biomasse dérivée comme les résidus de biomasse, des transformations qu'elle a subi par après (eaux usées, boues, déchets agricoles, ...), ou les résidus animaliers (fumier). De plus, des paramètres externes, liés au climat pendant la culture, la récolte, le transport et le stockage de la biomasse (période de récolte, temps de sèche, vent, altitude, température, humidité ambiante), vont augmenter la variabilité entre les échantillons étudiés.

Comme l'illustre la Figure 2.2, l'analyse sommaire s'exprime en fonction trois bases massiques différentes définies comme suit : la biomasse brute (*as recieved, ar*), la biomasse sèche (*dry, d*) et la biomasse sèche sans cendre (*dry ashe free, daf*). Tandis que l'analyse élémentaire s'opère uniquement sur une base sèche et sans cendre.

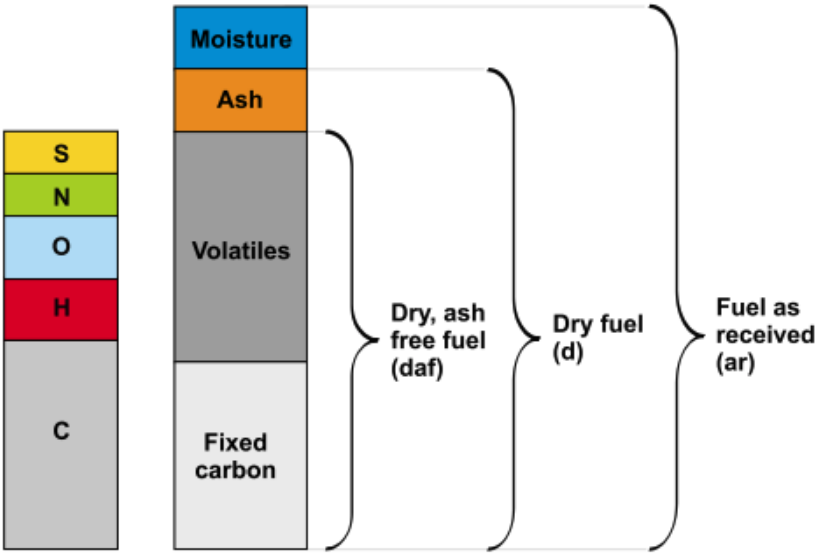


FIGURE 2.2 – Paramètres mesurés, à droite, avec l'analyse sommaire, de haut en bas : le taux d'humidité (base brute, ar), de cendres (base sèche d), de matière volatile et de carbone fixe (base sèche et sans cendre, daf). Et, à gauche, avec l'analyse élémentaire, de haut en bas : le taux de sulfure, d'azote, d'oxygène, d'hydrogène et de carbone. [20]

2.1.1 Composition physique : analyse sommaire

L'analyse sommaire mesure le taux massique d'humidité (*Moisture, (M)*), de matière volatile (*Volatile Matter, (VM)*), de carbone fixe (*Fixed Carbon, (FC)*) et de cendres (*Ashes, (A)*).

Deux notations sont utilisées pour faire référence au taux massique d'humidité dans la biomasse (M) et (M') définies aux équations (2.1) et (2.2). On le mesure en séchant la biomasse à 105 °C. L'humidité est le facteur qui varie le plus pour la biomasse de même origine en fonction de paramètres extérieurs comme le climat, la date de la récolte, les conditions de stockage et de pré-traitement. Typiquement, l'humidité du bois peut être de 100 $\%_{ar}$ lorsqu'il vient d'être coupé, 50 $\%_{ar}$ lorsqu'il a séché à l'air et entre 30 et 5 $\%_{ar}$ quand il est pré-séché.

$$M = \frac{m_{H_2O}}{m_d} \cdot 100 \quad [\%_{\mathrm{d}}] \tag{2.1}$$

$$(M') = \frac{m_{H_2O}}{m_d + m_{H_2O}} \cdot 100 = \frac{(M)}{1 + (M)/100} \quad [\%_{\mathrm{ar}}] \tag{2.2}$$

La matière volatile est la partie de la biomasse qui va se gazéifier lors de la pyrolyse. Elle est constituée d'une partie de C,O,H,N,S. On la mesure en carbonisant la biomasse sèche à $T_{carb} = 1050°C$, température à laquelle sa production est maximale. Typiquement, la matière volatile du bois se situe aux alentours de 80 $\%_{\mathrm{d}}$.

La fraction de carbone fixe, est obtenue en oxydant (injecter de l'oxygène pur) la matière restante après la carbonisation (C,H,O restants). Typiquement, la matière volatile du bois se situe aux alentours de 80 $\%_{\mathrm{d}}$.

Les cendres sont les résidus obtenus après l'oxydation du carbone fixe. Elles sont constituées de matière minérale contenue en petite quantité dans la biomasse tels que le silicium Si, le calcium Ca, le magnésium Mg, le potassium K, le sodium Na et le phosphore P. La composition des cendres d'une biomasse est un paramètre non négligeable car elles peuvent causer des problèmes d'agglomération (mâchefers) sur la grille, de la corrosion sur les parois du brûleur ou encore des cendres volantes dans les fumées en sortie. Typiquement, le taux de cendre du bois se situe aux alentours de 1 $\%_{\mathrm{d}}$.

2.1.2 Composition chimique : analyse élémentaire

L'analyse élémentaire mesure le taux massique de carbone (C), d'hydrogène (H) et d'azote (N). Le calcul du taux d'oxygène, la formule organique et la masse molaire de la biomasse s'écrivent respectivement :

$$(O) = 1 - (C) - (H) - (N) - (S) \tag{2.3}$$

$$\mathrm{CH}_y\mathrm{O}_x\mathrm{N}_z\mathrm{S}_u \tag{2.4}$$

$$M_{CH_yO_xN_zS_u} = M_C + y \cdot M_H + x \cdot M_O + z \cdot M_N + u \cdot M_S \tag{2.5}$$

Avec :

- $y = \frac{(H)}{(C)} \frac{M_C}{M_H}$
- $x = \frac{(O)}{(C)} \frac{M_C}{M_O}$
- $z = \frac{(N)}{(C)} \frac{M_C}{M_N}$
- $u = \frac{(S)}{(C)} \frac{M_C}{M_S}$

La formule organique du bois est : $\mathrm{CH}_{1,44}\mathrm{O}_{0,66}$,

2.1.3 Le pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique désigne la quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible. Dans ce travail, il est exprimé en fonction de la masse, en kJ/kg, car on travaille avec de la biomasse solide. On distingue le pouvoir calorifique supérieur PCS et le pouvoir calorifique inférieur PCI. Le premier suppose que la vapeur d'eau contenue dans les fumées est déjà condensée (et donc son énergie récupérée) tandis que le second pas [27].

En effet, l'eau est contenue sous deux formes dans la biomasse. On parle donc d'humidité inhérente $(\mathrm{M})_{\mathrm{i}}$ (eau liée) et d'humidité de surface $(\mathrm{M})_{\mathrm{s}}$ (eau non liée). Le taux

d'humidité (M) mesuré est l'addition de ces deux formes. Entre 0 % et 30% d'humidité, l'eau est liée à la structure avec des ponts hydrogènes (O···H) qui demandent plus d'énergie pour les détacher. Cette eau a un effet sur le volume de la biomasse (elle le fait gonfler) et a une pression de vaporisation plus faible que l'eau liquide à la même température. Au-delà de 30% d'humidité, l'eau est n'est plus liée, c'est-à-dire qu'elle est présente dans la matrice poreuse sous forme liquide ou gazeuse. Cette eau a une pression de vaporisation égale à celle l'eau liquide ou gazeuse à la même température [18]. Le PCS fait donc l'hypothèse que toute l'humidité est surfacique alors que le PCI prend en compte la perte d'énergie liée à l'humidité inhérente. Il y a donc quatre façons d'exprimer le pouvoir calorifique : le PCS brut [kJ/kg$_{ar}$] , le PCI brut en [kJ/kg$_{ar}$], le PCS sec [kJ/kg$_{d}$] et PCI sec [kJ/kg$_{d}$].

Le PCS brut est une mesure faite grâce à un laboratoire appelé "bombe calorimétrique". Sur base de ces mesures, une formule empirique a été trouvée reliant les composés organiques de la biomasse comme le montre l'équation (2.6). Les paramètres qui influencent positivement le PCS sont le taux de C, H, et S. À l'inverse, le taux de N,O et de cendres influencent négativement le PCS.

$$\mathrm{PCS} = (0{,}3491\,(\mathrm{C}) + 1{,}1783\,(\mathrm{H}) + 0{,}1005\,(\mathrm{S}) - 0{,}0151\,(\mathrm{N}) - 0{,}1034\,(\mathrm{O}) - 0{,}0211\,(\mathrm{A})) \cdot 10^{3} \ \ [\mathrm{kJ/kg_d}] \tag{2.6}$$

Lors de la phase de séchage, l'humidité inhérente (liée à H) s'évapore différemment que l'humidité de surface. L'évaporation un procédé endothermique qui utilise la chaleur émise par la combustion pour s'entretenir. Ce qui a pour conséquence de ralentir et de diminuer la température de cette dernière. Il existe un seuil d'humidité (60 $\%_{ar}$) au-delà duquel la combustion ne peut pas s'entretenir car l'évaporation diminue trop la température. Le PCI_{ar}, qui tient compte de l'énergie perdue dans l'étape de séchage se calcule donc en fonction du taux d'humidité. Typiquement, le PCI du bois est de 18 500 kJ kg^{-1}.

$$PCI = PCS - 2500 \cdot (H) \cdot 8,936 \ \ [\mathrm{kJ/kg_{daf}}] \tag{2.7}$$

Avec l'enthalpie de vaporisation de l'eau à 0°C : $\Delta h_{v,H_2O,0°C} = 2500$ kJ/kg et la fraction moléculaire entre l'eau et l'hydrogène $M_{H2O}/M_{H2} = 8,936$ −

Pour illustrer l'influence de la composition chimique de la biomasse sur le pouvoir calorifique, la Figure 2.3, représente les types de combustible en fonction de leurs rapports H/C et O/C. La figure 2.3 montre que lorsque le rapport O/C diminue, le pouvoir calorifique augmente et l'inverse se produit pour le rapport H/C ce qui concorde avec la combinaison des équations (2.6) et (2.7).

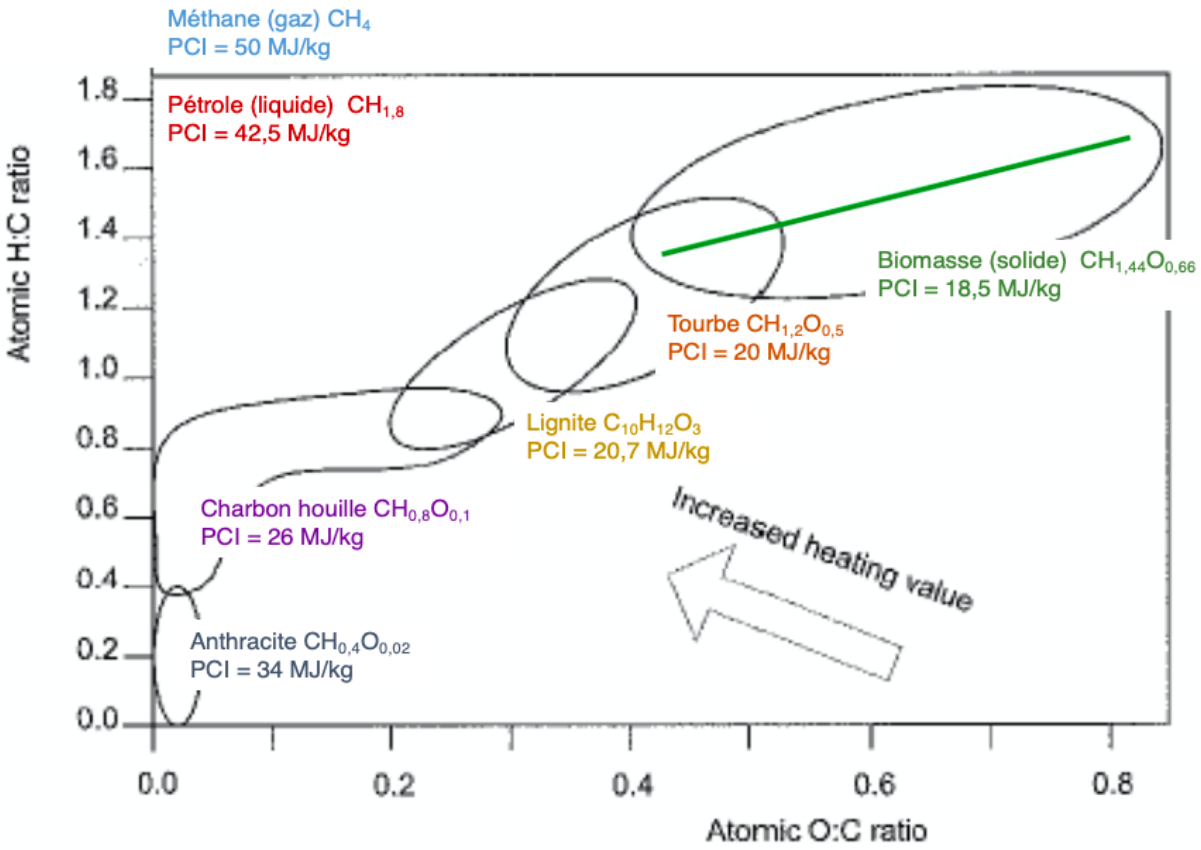


FIGURE 2.3 – Représentation de l'effet de la composition chimique des combustibles solides : biomasse standard, tourbe, lignine, charbon, anthracite, par rapport au combustible liquide (pétrole) et gazeux (méthane) qui ne contiennent pas d'oxygène. Un faible ratio de O/C, et un haut ratio H/C augmente le pourvoir calorifique [15]

2.1.4 Granulométrie, densité et écoulement,

Granulométrie du combustible influence les pertes de charge dans le lit de combustion. Un combustible en petits morceaux amènera des pertes de charges plus faibles que celles d'un combustible poussiéreux. Ce qui, dans le premier cas, rendra possible le tirage naturel et, dans le second cas, va nécessiter de forcer le flux d'air à entrer avec un ventilateur. Le combustible est trop léger pour réagir complètement, ce qui va augmenter la quantité de polluants dans les fumées. De plus, les combustibles de granulométrie uniforme, comme les pellets ou les briquettes, permettent une meilleure prédiction du comportement de la pyrolyse et donc une meilleure compréhension de l'influence de paramètres dimensionnels sur la combustion.

La masse volumique apparente et sans tassement, ρ, définit le poids d'une unité de volume (2.8). Comme point de comparaison, la masse volumique du bois est au alentours de 250 kg/m^3. Au même titre que l'humidité inhérente, il existe une masse volumique instrasèque définie à l'équation (2.9), venant du fait que de l'eau liée a une influence sur le volume de la biomasse. ρ_i est masse volumique intrasèque et G_m est la densité spécifique, définie en fonction du taux d'humidité.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \tag{2.8}$$

$$\rho_i = 1000 \cdot G_m \cdot (1 + (M)/100) \quad [\mathrm{kg/m^3}] \tag{2.9}$$

La puissance combustible, P_{comb}, est une fonction du PCI et du débit de combustible $\dot{m_{comb}}$ (2.10). Avec l'équation (2.8), le débit de combustible peut être exprimé en fonction du débit volumique et de sa densité apparente comme illustré dans l'équation(2.11). Les brûleurs à petite échelle ont des puissances de l'ordre d'une dizaine de kilo Watt [30] et ceux à grande échelle sont de l'ordre de dizaines de méga Watt [32], voire de l'ordre de quelques giga Watt pour les centrales nationales [32].

$$P_{comb} = \dot{m_{comb}} \cdot \frac{PCI_{comb}}{3600} \quad [\mathrm{kW/h}] \tag{2.10}$$

$$P_{comb} = \frac{\rho_{comb} \cdot V_{comb}}{t} \cdot \frac{PCI_{comb}}{3600} \quad [\mathrm{kW/h}] \tag{2.11}$$

L'écoulement de la biomasse dépend du type de chargement : en série ou en continu. Pour le chargement en série, l'écoulement de la biomasse n'est pas à mentionner. Lorsque la biomasse est ajoutée en continu, dans les brûleurs à grande échelle, ce type d'alimentation est très souvent utilisé et ne constitue pas un enjeu majeur car on travaille avec des grosses puissances. Par contre, ce n'est pas le cas pour les brûleurs à petite échelle, qui n'ont pas assez d'inertie thermique pour rester stable lors de l'ajout de biomasse fraîche. L'écoulement de la biomasse devient donc un facteur important dans le procédé de combustion. Lui-même étant influencé par le type de mécanisme d'alimentation en continu (les principaux sont illsutrés à la Figure 2.4), l'évacuation des cendres, l'angle de talus, le contrôle de la répartition de la biomasse dans le lit de combustion.

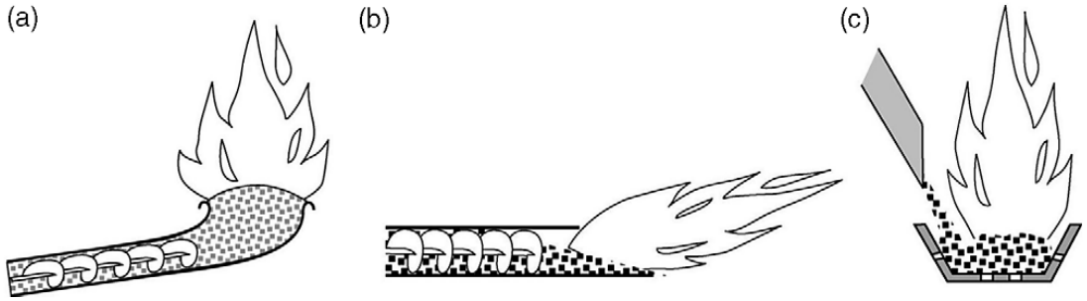


FIGURE 2.4 – Différents mécanismes d'alimentation en continu de la biomasse dans les brûleurs à grande échelle. (a) par le dessous ; (b) horizontalement ; (c) par le dessus [7]

2.2 Combustion : caractérisation de la combustion complète

L'équation globale du procédé de combustion d'une mole de biomasse s'écrit avec l'équation (2.12). Il est caractérisé par quatre technologies de conversions thermochimiques de la biomasse, définies dans les sections de ce chapitre, (représentés à la Figure 2.5), dans l'ordre temporel : le séchage, la pyrolyse, la combustion primaire, et la combustion secondaire. La suite de ce chapitre s'attellera à décrire les concepts importants faisant partie de ces technologies, comme les polluants, l'excès d'air, la distribution de l'air et le tirage d'une cheminée.

$$CH_yO_xN_u + n_1 \cdot (O_2 + 3{,}76\,N_2) + n_2 \cdot (H_2O)_l \longrightarrow CO_2 + n_3 \cdot (H_2O)_g + n_4 \cdot O_2 + n_5 \cdot N_2 \quad (2.12)$$

Avec :

- $(M)_{daf} = \frac{(M)_{ar}}{1-(A)_d\ (1-(M)_{ar})-(M)_{ar}}$
- $n_{moisture} = \frac{(M)_{daf}}{100} \frac{M_{H_2O}}{M_{CH_yO_x}}$
- $n_{O_2} = \left(1 + \frac{y-2x}{4}\right)$
- $n_1 = \lambda\ n_{O_2}$
- $n_2 = n_{moisture}$
- $n_3 = \frac{y}{2} + n_{moisture}$
- $n_4 = (\lambda - 1)\ n_{O_2}$
- $n_5 = \frac{u}{2} + 3,76\ \lambda\ n_{O_2}$

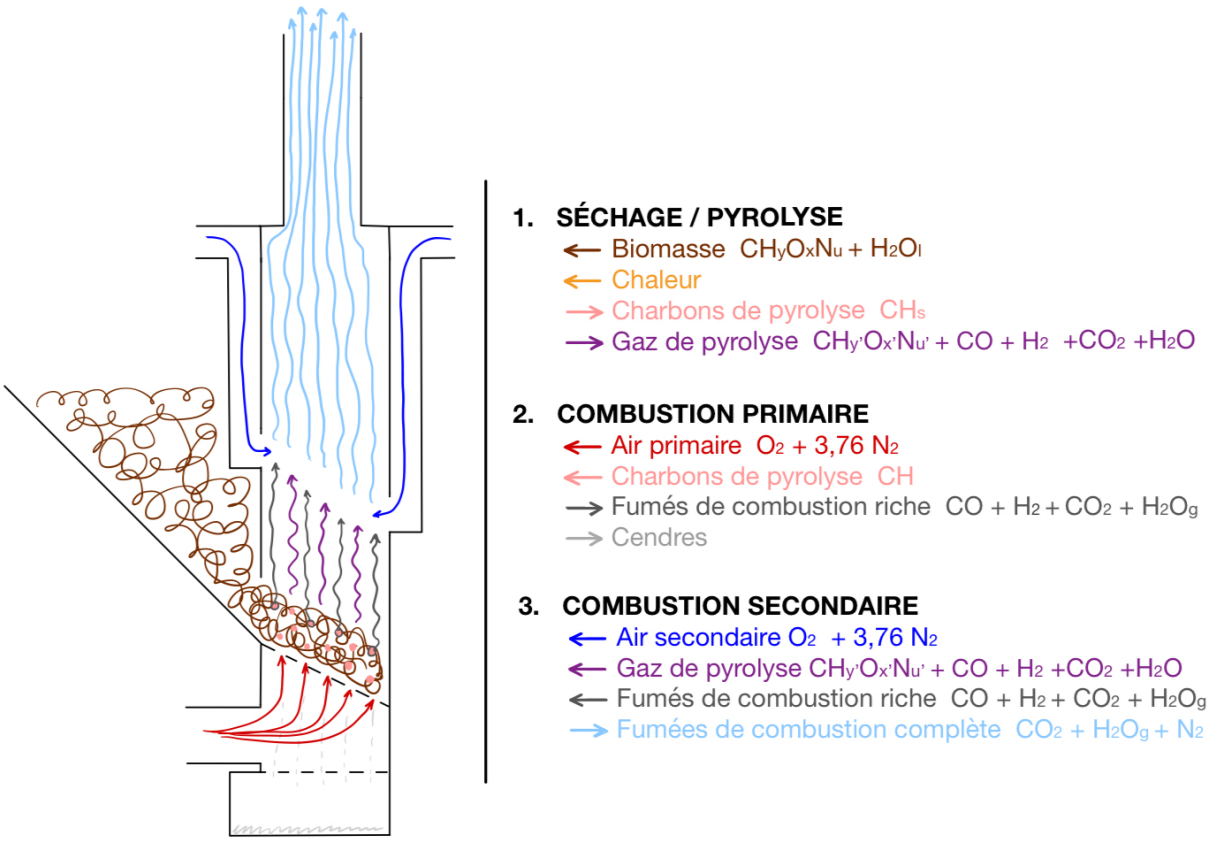


FIGURE 2.5 – Les différentes technologies de conversion thermochimiques de la biomasse : le séchage, la pyrolyse, la combustion primaire et la combustion secondaire

2.2.1 Le séchage et la pyrolyse

La première étape est celle du séchage, l'eau contenue dans la biomasse s'évapore à de faibles températures ($T_{sec} = 100°C$). Comme dit précédemment, ce procédé est endothermique. Il utilise l'énergie thermique dégagée par la combustion primaire pour s'entretenir. À cette étape, la masse et le volume de la biomasse décroissent jusqu'à ce que cette dernière soit sèche.

$$(CH_yO_xN_u)_s + (H_2O)_l + \text{chaleur} \longrightarrow (H_2O)_g \tag{2.13}$$

La pyrolyse est l'étape de décomposition de la biomasse (2.14) : les gaz volatiles ($(CH_{y'}O_{x'}N_{u'})_g$, CO et H_2) se détachent du carbone fixe ($(CH)_s$issuissu). Le gaz produit, appelé gaz de pyrolyse ou volatiles est un gaz combustible issus de la biomasse, il a donc des propriétés calorifiques différentes de la biomasse solide dont il est issus.

$$(CH_yO_xN_u)_s + \text{chaleur} \longrightarrow a \cdot (CH)_s + b \cdot (CH_{y'}O_{x'}N_{u'})_g + c \cdot CO + d \cdot H_2 \tag{2.14}$$

Il est important de noter que le séchage et la pyrolyse sont deux procédés qui ne demandent aucun d'apport d'oxygène. Le seul paramètre limitant est la chaleur. Dès que la température augmente, le séchage de la biomasse s'accélère. Autour de $T_{pyr,Seuil} = 200°C$, la température est assez haute pour que la pyrolyse commence. Comme le montre la Figure 2.6, la nature de la décomposition de la biomasse dépend de la température. La production volatile de charbon démarre autour de $T_{vol} = 450 - 550°C$ et augmente avec la température. Tandis que pour les charbons, leur production est maximum lorsque la dé-volatisation commence et diminue avec la température, jusque $T_{carb} = 1050°C$, où il ne reste plus que du carbone fixe. Le problème des goudrons dans les gaz de pyrolyse est aussi diminué avec la température.

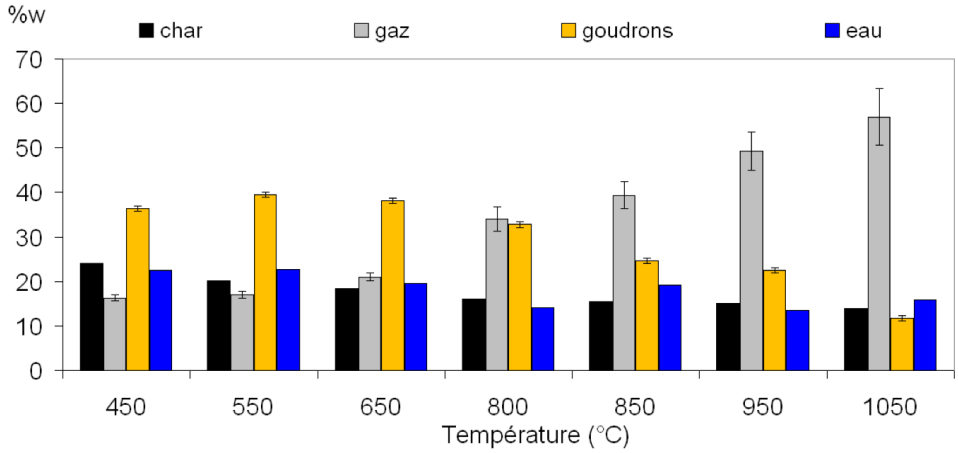


FIGURE 2.6 – Rendement massique global de la pyrolyse du bois de hêtre à différentes températures entre 450 et 1050 °C [13]. $\%w = \%_a r$

2.2.2 La combustion primaire

La combustion primaire est l'oxydation du charbon de pyrolyse (charbon CHs) en fumées riches (CO et H_2, CO_2 et H_2O) et cendres (minéraux, partie non oxydable de la biomasse). C'est l'étape qui va définir la puissance car c'est elle qui fournit la chaleur (par radiation et conduction) dont le séchage et la pyrolyse ont besoin. Ce phénomène

est illustré à la Figure 2.7 La combustion est une série de réactions d'oxydation. C'est la cinétique de ces réactions qui explique que la quantité de monoxyde de carbone dans les fumées augmentera avec la température tandis que celle de dioxyde de carbone diminuera.

$$(CH)_s + \lambda_{\text{prim}} \cdot O_2 \longrightarrow a_1 \cdot CO + a_2 \cdot H_2 + a_3 \cdot CO_2 + a_4 \cdot (H_2O)_g + \text{chaleur} \quad (2.15)$$

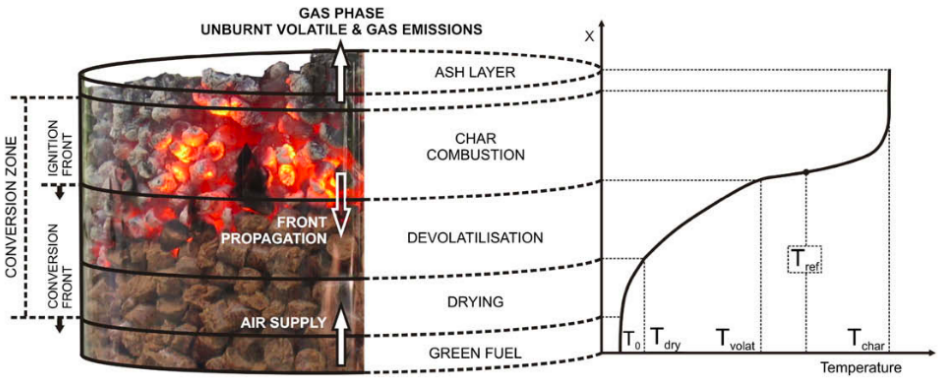


FIGURE 2.7 – Propagation des fronts de conversion et d'allumage dans un lit fixe remplit de biomasse [24]. $T_{dry} = T_{sec}$, $T_{char} = T_{carb}$

Le paramètre limitant de la combustion primaire est la quantité d'air disponible à proximité des charbons chauds. S'il n'y a pas assez d'air primaire, la chaleur dégagée par la combustion diminue, et la pyrolyse ralentit jusqu'à ne plus pouvoir produire du charbon, nécessaire pour la combustion.

2.2.3 La combustion secondaire

La combustion secondaire est l'oxydation des gaz de pyrolyse ($CH_{y'}O_{x'}N_{u'}$ et CO, H_2) et des fumées riches dégagées pas la combustion du charbon (CO et H_2, CO_2 et H_2O). La combustion secondaire est visible, grâce à la flamme qu'elle émet lorsque les gaz entièrement oxydés, dépourvus de toute valeur énergétique, sont brûlés. Cela garantit que tous les hydrocarbures présents dans le combustible de la biomasse sont oxydés en dioxyde de carbone et en vapeur d'eau.

$$(CH_{y'}O_{x'}N_{u'})_g + CO + H_2 + \lambda_{\text{sec}} \cdot O_2 \longrightarrow b_1 \cdot CO_2 + b_2 \cdot (H_2O)_g + \text{chaleur} \quad (2.16)$$

Le paramètre limitant de la combustion secondaire est la quantité d'oxygène et la qualité du mélange avec les volatiles. S'il n'y a pas assez d'air secondaire, la combustion sera incomplète, tous les volatiles ne seront pas brûlés et du monoxyde de carbone résiduel sera rejeté dans l'atmosphère.

2.2.4 Polluants : origine et impacts

Comme expliqué à la section précédente, en théorie, il n'a plus de monoxyde de carbone dans les fumées chaudes en sortie de la combustion. Malheureusement, en réalité, la combustion ne se fait pas parfaitement. Il y a encore du monoxyde de carbone et des particules (goudrons) venant de la combustion incomplète du charbon et des gaz de pyrolyse dans produits de la combustion. D'une part, ces fumées polluées ont un impact négatif direct sur la santé, et plus particulièrement sur le système respiratoire de la population d'une

	Load [kW]	Excess air ratio	CO [mg/m³]	C_xH_y [mg/m³]	Particles [mg/m³]	NO_x [mg/m³]	Temp [°C]	Efficiency [%]
Wood-stoves	9.33	2.43	4986	581	130	118	307	70
Fireplace inserts	14.07	2.87	3326	373	50	118	283	74
Heat-storing stoves	13.31	2.53	2756	264	54	147	224	78
Pellet stoves	8.97	3.00	313	8	32	104	132	83
Catalytic wood-stoves	6.00		938					

Note: The term m^3_0 designates volume at standard reference condition; pressure 101.3kPa and temperature 273K.

FIGURE 2.8 – Moyenne des émissions en $mg/m^3_{0°C}$ à 13 % O_2 pour des applications de combustion de biomasse à petite échelle. [15]. La conversion des émissions de CO en ppm donne : 3989, 2661, 2205, 250, 750 (de haut en bas).

part. Le monoxyde de carbone est un poison. C'est d'ailleurs la deuxième cause de décès sur le continent Africain, bien avant l'hygiène insalubre et la Malaria [17]. D'autre part, ces polluants contribuent à l'aggravation de l'effet de serre, ayant ainsi un impact négatif sur le climat. [19].

La quantité de monoxyde de carbone dans l'atmosphère est souvent donné en ppm (parties par milion, 1 ppm vaut 1.25 mg/m3 à 0 °C [31]) , qui mesure le nombre de molécules de polluant dans un million de molécules d'air. Cette mesure permet d'avoir directement une idée du pourcentage d'air pollué et donc de l'impact des polluants sur notre environnement[14]. Pour avoir un ordre d'idée, la Figure 2.8 illustre les émissions des applications courantes de combustion de la biomasse.

Dans le cas de l'*étude de la combustion des boues de barattage*, ce sont les émissions de CO qui seront l'indicateur de la qualité de la combustion car elles proviennent de la combustion incomplète de la biomasse. Leur augmentation dans les fumées produites implique donc une mauvaise utilisation du procédé, donc un éloignement de l'optimum.

Il est important de noter que d'autres polluants sont produits lors de la combustion comme le NO, NO_x (l'azote vient de l'air et du combustible) et SO_x, mais ne constituent pas un problème pour l'utilisation du prototype.

2.2.5 L'excès d'air

Afin de brûler complètement la biomasse et diminuer la quantité de polluants il est nécessaire augmenter le mélange avec un *excès d'air* λ. Comme son nom l'indique, l'excès d'air est la quantité d'air ajoutée à la valeur théorique, stoechiométrique. Il est défini à l'équation (2.17). En théorie, la combustion complète se passe donc à $\lambda = 1$, mais en réalité il faudra $\lambda > 1$ pour atteindre cet objectif.

$$\lambda = \frac{\left(\frac{m_{air}}{m_{comb}}\right)}{\left(\frac{m_{air}}{m_{comb}}\right)_{stoechio}} \quad [-] \tag{2.17}$$

La valeur d'excès d'air déterminante est celle de l'air secondaire λ_{sec}. En dessous de $\lambda < 0,5$, il n'y pas assez d'air pour que la combustion se produise. Les fumées de pyrolyse ne sont donc pas brûlées (fumées blanches et opaques). Au-dessus de $\lambda > 3$, il y a trop

d'air qui refroidit et éteint la combustion. Les fumées de pyrolyse ne sont donc pas brûlées non plus. Dans l'intervalle $0,5 < \lambda < 1$ la combustion est incomplète (combustion riche). Pour les brûleurs à grande échelle ayant une meilleure inertie thermique, l'excès d'air est typiquement $\lambda \approx 1,5$ et pour ceux à petite échelle, $\lambda \approx 2$. L'équation (2.18) exprime le débit d'air total prenant en compte l'excès d'air et l'équation chimique globale de la combustion.

$$\dot{Q_{air}} = \frac{n_1 \cdot 4,76 \cdot M_{air}}{n_{comb} \cdot M_{comb}} \cdot \frac{\dot{m_{comb}}}{\rho_{air}} \quad [\mathrm{m^3/h}] \tag{2.18}$$

2.2.6 Distribution de l'air

Le ratio d'air primaire r_{prim} est défini comme la fraction du débit volumique de l'air primaire, $\dot{Q_{prim}}$ sur le débit volumique de l'air total, $\dot{Q_{tot}}$ (équation (2.19)). En effet, la combustion complète de la biomasse demande deux arrivées d'air (primaire et secondaire). La répartition du débit total d'air entre ces deux côtézones a une influence non négligeable sur le procédé. D'un côté, l'air primaire impose la puissance en excitant la pyrolyse. De l'autre côté, l'air secondaire assure un bon mélange entre l'air et les volatiles et donc la diminution des polluants. C'est pourquoi, le débit d'air secondaire est toujours plus élevé que le primaire. Typiquement, le ratio d'air primaire se situe autour de $r_{prim} = 20\%$ [28]

$$\dot{Q_{prim}} = r_{prim} \cdot \dot{Q_{air}} \quad [\mathrm{m^3/h}] \tag{2.19}$$

$$\dot{Q_{sec}} = (1 - r_{prim}) \cdot \dot{Q_{air}} \quad [\mathrm{m^3/h}] \tag{2.20}$$

2.2.7 Le tirage

Le tirage d'un brûleur joue un rôle non négligeable dans la combustion car c'est lui qui contrôle le flux d'air. D'un côté, il va être ralenti sur son passage à cause de la géométrie des conduits d'évacuation des fumées. La perte de charge associée à ce phénomène est écrite à l'équation (2.21). De l'autre côté, la différence de température entre l'air extérieur et celle des fumées induit une force motrice qui "aspire" le flux vers le haut de la cheminée. Ce phonème est appelé le *tirage naturel*. La perte de charge qu'il induit et les hypothèses associées sont formulées à l'équation (2.22) [35] [33]. Dans certains cas, les partes de charges liées au passage de l'air à travers le lit de biomasse rendent impossible le tirage naturel comme seule force motrice. Dans ces cas, un ventilateur d'extraction est utilisé.

$$\Delta p_{fumees} = \zeta \cdot \rho_{fumees,int} \cdot \frac{u^2_{fumees}}{2} \quad [\mathrm{Pa}] \tag{2.21}$$

$$\Delta p_{cheminee} = \rho_{air,ext} \cdot g \cdot h_{cheminee} \cdot \left(1 - \frac{T_{air,ext}}{T_{fumees}}\right) \quad [\mathrm{Pa}] \tag{2.22}$$

Les hypothèses sont les suivantes :

— Le coefficient de perte de charge est composé d'une partie régulière (due au frottements) et singulière (due à la géométrie). La partie régulière est supposée négligeable car le prototype est à petite échelle (petite cheminée).

$$\zeta = \zeta_{reg} + (\zeta_{sing,entree} + \zeta_{sing,coude} + \zeta_{sing,sortie}) \approx 0 + 0,5 + 0,5 + 1 = 2$$

— Les variations des densités avec la pression sont = $\rho \approx \rho(T)$ et $p_{int} \approx p_{ext}$

— La composition des fumées est approximée à celle de l'air : $\rho_{fumee} \approx \rho_{air}$

— Les conditions standards sont applicables à l'extérieur : $T_{air,ext} = 20$ °C et $p_{ext} = 1$ atm

— La température à l'intérieur de la cheminée est constante : $T_{fumee,int} \approx constante$

2.3 Conception : description des brûleurs à petite échelle

Bien que la domestication du feu remonte à environ 400 000 ans avant notre ère, la compréhension moderne de la combustion avec la théorie du "tétraèdre du feu" (combustible, comburant, énergie d'activation et radicaux libres) n'a été établie qu'en 1980 [34]. Ainsi, la combustion reste une technologie à la fois ancienne et incroyablement moderne. La section précédente a exploré la théorie moderne de la combustion, tandis que cette section se concentrera sur l'analyse de l'aspect rustique, "low tech" de cette technologie.

Depuis toujours, les pays du Sud utilisent des brûleurs à petite échelle pour la cuisson. Offrant une variété de solutions inspirantes. Elles mettent en évidence le fait que le brûleur de boue de karité doit être conçu en s'assurant d'être culturellement acceptable, abordable et adapté aux besoins des PME. Cette section explorera brièvement quelques solutions de brûleurs existantes dans les pays du Sud, et mettra en évidence leurs caractéristiques de conception spécifique.

2.3.1 Le foyer "trois pierres" traditionnel et amélioré

Le foyer "trois pierres" est apparu en -12000 ans avec les premières poteries [23]. Contrairement aux feux ouverts, ce type de foyer place le récipient de cuisson très près du feu pour minimiser les pertes de chaleur. Un espace surchauffé se forme alors entre le récipient et le feu. En utilisant les pierres comme brise-vent (illustré à la Figure 2.9a), on améliore les propriétés thermiques du feu de cuisson. De plus, la combustion peut être optimisée en utilisant des bûches de bois introduits lentement dans le feu, et en ne brûlant que les extrémités des bâtons. L'amélioration du foyer "3 pierres" se fait grâce à l'ajout d'un cercle de pierres pour éviter la propagation du feu et éloigner le vent (illustré à la Figure 2.9b) [21].

(a) Brûleur "3 pierres" traditionnel

(b) Brûleur "3 pierres" amélioré

2.3.2 Foyers métalliques avec du bois

[30] , [6]

2.3.3 Foyers améliorés avec de la balle de riz

Les brûleurs à balle de riz sont intéressants dans le projet car ce combustible est très fin et énergétique, comme les boues de karité. Sur la Figure 2.10a, on observe le réservoir tout autour de la grille d'air primaire. Le cercle métallique extérieur est un support pour les casseroles. Sur la Figure 2.10b les balles de riz sont dans le réservoir et la combustion se produit dans le foyer. Les tons orangers de la flamme sont visibles à travers les trous pour l'air secondaire. [29], [4], [8]

(a) Brûleur vide

(b) Bruleur en pleine opération

FIGURE 2.10 – Brûleur à balle de riz

2.3.4 Foyers optimisés avec des pellets

[7] [8]

Chapitre 3

Matériel et méthodes

Cette section est essentielle pour comprendre le processus expérimental utilisé dans ce travail. Trois aspects y sont abordés : la caractérisation du combustible (boues de barattage), les choix faits pour la conception du prototype d'essai et la description du plan d'expérimentation. Ces éléments jouent un rôle fondamental dans la collecte de données et l'analyse des résultats.

3.1 Caractérisation des boues de karité

En raison de la rareté des analyses sur les boues de barattage, un combustible particulier et peu répandu, il est crucial de caractériser cette biomasse de manière approfondie afin de comprendre son comportement lors de la combustion (un tableau récapitulatif est disponible à l'Annexe A.2). En avril 2021, le laboratoire du Cirad a réalisé et publié une caractérisation des boues de karité, fournissant des données détaillées disponibles à l'Annexe A.1. Ces informations constituent une ressource précieuse pour interpréter les résultats des expériences faites en laboratoire.

FIGURE 3.1 – Échantillon des boues présentes au laboratoire de l'UCLouvain

3.1.1 Analyse sommaire et élémentaire

Le taux d'humidité s'obtient en plaçant un échantillon de biomasse dans un four préchauffé à 105 °C (100 °C étant la température d'évaporation de l'eau) pendant 24h. L'expérience a été réalisée sur trois échantillons de boues de granulométrie aléatoire. L'expérience est représentée à la Figure 3.2. Les taux d'humidité bruts et secs obtenus sont, respectivement, (M') = 9,49 $\%_{ar}$ et (M) = 10,49 $\%_{d}$. Ce taux d'humidité est plus haut que celui obtenu par le Cirad : 3,7 $\%_{ar}$ mais reste faible. Cette différence peut s'expliquer par la différence de climat et de saison entre le Burkina-Faso en avril 2021 (en moyenne 1 jour de pluie et de 27 à 40 °C [25]) et la Belgique en novembre 2022 (en moyenne 10 jours de pluie et de 5 à 9 °C [26]).

Les valeurs du PCS et du PCI bruts vont donc légèrement diminuer comparé à ceux annoncés par le Cirad. Le PCI brut se calcule avec l'équation (3.1) et sur base du PCI sec donné par le Cirad. La valeur obtenue pour les boues du laboratoire est $PCI_{ar} =$

FIGURE 3.2 – Setup de mesure de l'humidité des boues de barattage. À droite le four préchauffé avec les échantillons à l'intérieur. À gauche, les échantillons de calibres aléatoires.

22299 kJ/kg$_{ar}$ (légèrement plus faible que la valeur du Cirad $PCI_{ar,Cirad} = 23748$ kJ/kg$_{ar}$). Cette diminution de PCI sera à prendre en compte lors du dimensionnement du débit de boues : pour une même puissance, il faudra un plus grand débit de biomasse si le PCI diminue (Référence à l'équation (2.11)).

$$PCI_{ar} = \frac{PCI_d - 2500 \cdot (M)_{ar}}{1 + (M)_{ar}} \quad [\text{kJ/kg}] \tag{3.1}$$

L'analyse élémentaire a été réalisée par le laboratoire MOST [22]. Il a permis de fournir l'analyse des 3 échantillons de biomasse préalablement séchés dans le four. La moyenne des taux de carbone, hydrogène, oxygène et azote est : $(C) = 59$ %$_{daf}$, $(H) = 6,9$ %$_{daf}$, $(O) = 30,6$ %$_{daf}$ et $(N) = 3,5$ %$_{daf}$. La formule organique des boues de barattage est donc $CH_{1,38}O_{0,40}N_{0,051}$, et sa masse molaire $M_{boues,daf} = 20,34$ kg$_{daf}$/kmol. Ces résultats concordent presque parfaitement à ceux du Cirad ($CH_{1,37}O_{0,36}N_{0,034}$ et $M = 19,73$ kg$_{daf}$/kmol). Ce qui était attendu car, le paramètre qui varie énormément, au sein d'un même type de biomasse, est l'humidité, en raison des nombreux facteurs qui l'influencent (climat, récolte, transports, etc.). Comme l'analyse élémentaire est exprimée sur base sèche (et sans cendre) elle ne devrait pas beaucoup varier en comparaison à celle du Cirad si elle a été correctement réalisée.

En résumé, l'analyse sommaire montre que les boues de barattage ont un PCI plus haut que la biomasse standard dû au faible taux d'humidité. La présence d'huile résiduelle joue aussi un rôle dans l'augmentation du PCI. Elle va pyrolyser et brûler comme les volatiles. Enfin, l'analyse sommaire confirme ce résultat : le ratio H/C est élevé tandis que le ratio O/C est plus faible que la biomasse standard. La Figure 3.3 montre que les boues de barattage se situent entre la tourbe et la biomasse standard d'un point de vue de sa composition chimique.

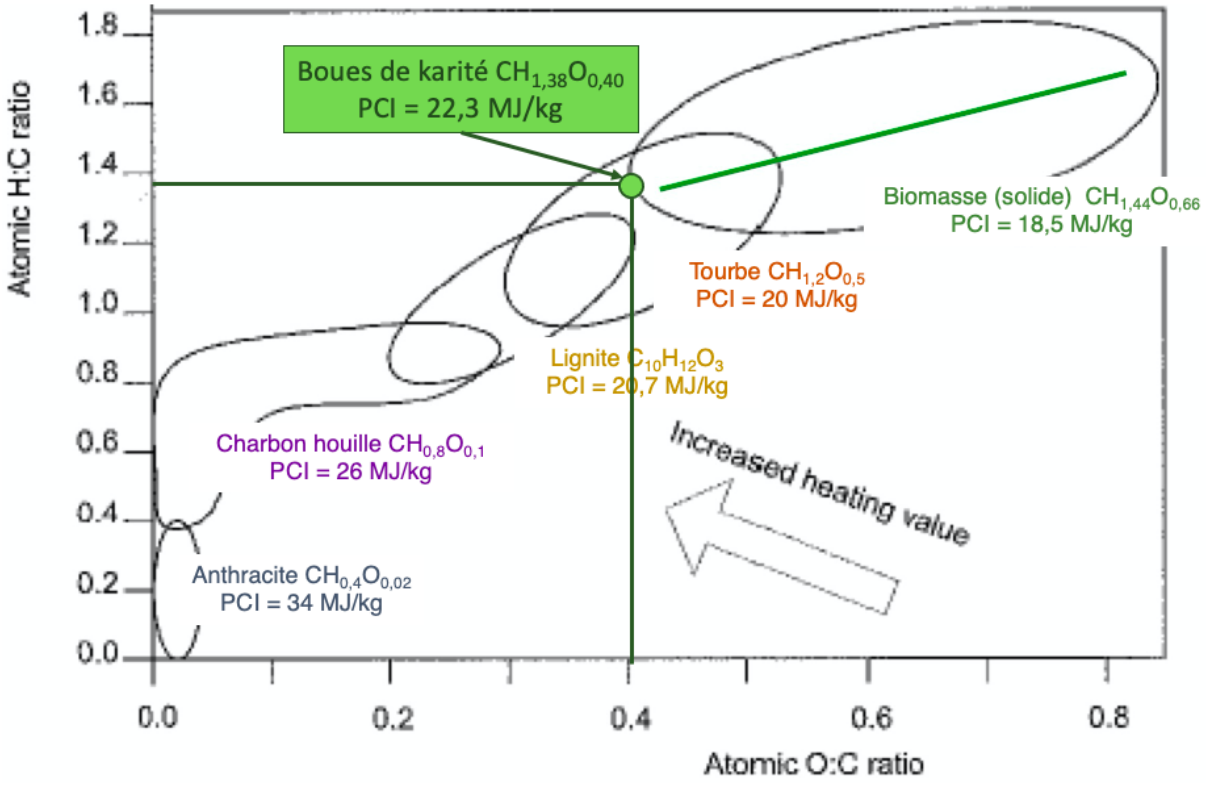
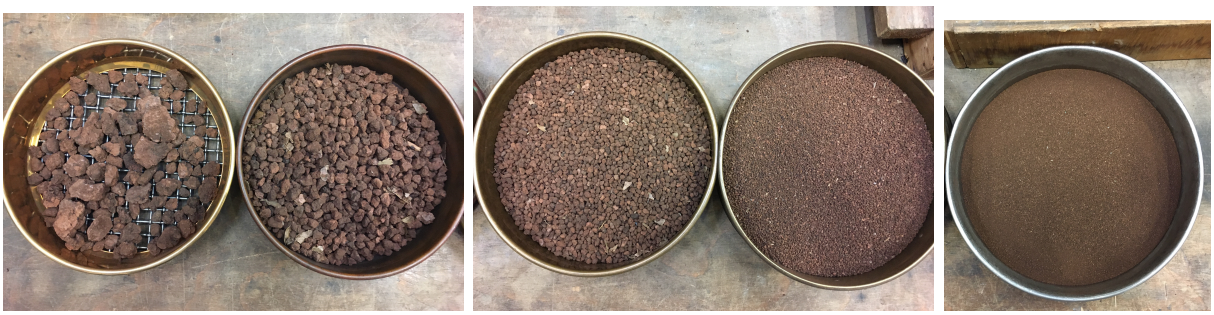


FIGURE 3.3 – Comparaison entre la composition chimique des boues de barattage et celle d'autres biomasses solides : les boues de barattage

3.1.2 Granulométrie, densité apparente et écoulement

La granulométrie de la biomasse a été obtenue en tamisant une masse initiale de boues de barattage à travers plusieurs tamis de calibres différents. Le calibre de ces tamis a été choisi pour comparer les valeurs avec celles du Cirad : 10 mm, 5 mm, 2mm et 600 µm. L'expérience a été répétée deux fois, tel qu'illustré à la Figure 3.4. La granulométrie, en pourcentage massique $\%_{ar}$, obtenue est la suivante : $X_{>10mm} = 12,98$, $X_{>5mm} = 18,75$, $X_{>2mm} = 28,09$, $X_{>600\mu m} = 26,09$, $X_{<600\mu m} = 18,75$. Le calibre des boues a beaucoup diminué : 74% pour le Cirad contre 13% au laboratoire. En plus d'être très friables, les boues ont été transportées durant 1 an et demi depuis le Burkina-Faso vers la Belgique, en passant par la France. Ce qui explique que les grosses boulettes se soient cassées en plus petits morceaux et l'apparition d'une quantité non négligeable de poussière. Pour éviter de remplir le cendrier avec cette poussière, la biomasse sera tamisée avant de la brûler : toute la biomasse plus petite que 2 mm sera écartée (45% de la biomasse sera écartée). De plus, ces valeurs de granulométrie vont avoir de l'influence lors du dimensionnement de la grille : il ne faudra pas que les trous soient trop grands pour ne pas gâcher toute la biomasse introduite, mais pas trop petits pour assurer une bonne évacuation des cendres. Une grille avec des trous de 3 ou 5 mm pourra être testée sur le prototype.



>10 mm et >5 mm >2mm et >600 µm <600 µm

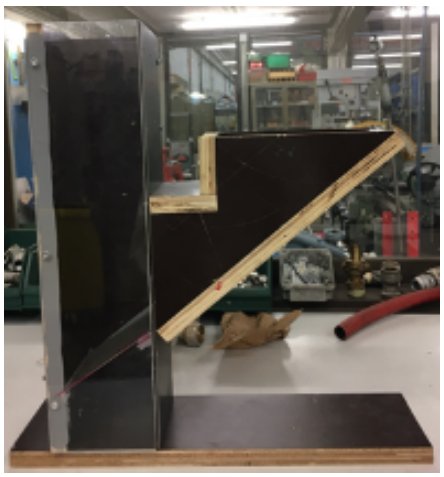
FIGURE 3.4 – Répartition de la granulométrie des boues après être passé dans les tamis

Pour mesurer la densité apparente, 3 échantillons de granulométries différentes ont été étudiés : tout-venant, >5 mm et >2mm. La même manipulation a été effectuée pour chaque échantillon, illustré à la figure 3.5 : remplir un récipient à ras bord de boues, peser celui-ci. Sachant la tare du récipient et son volume (en le remplissant d'eau), l'équation (2.8) peut être utilisée pour calculer les différentes masses volumiques : $\rho_{S,tout} = 398,2$ kg/m^3, $\rho_{S,>5mm} = 338,85$ kg/m^3 et $\rho_{S,>2mm} = 370,5$ kg/m^3. La densité de nos échantillons (398 kg/m3 brut) est plus élevée que celle calculée par le Cirad (273 kg/m3 brut). Ce qui était attendu au vu de la différence d'humidité entre les deux échantillons (9,5% au laboratoire et 3,7 % pour le Cirad). Cette augmentation de la densité implique une diminution du volume de combustible à puissance constante (2.11). Comme le PCI va aussi diminuer à cause de l'augmentation d'humidité, il n'y aura donc pas de grosses différences de débit volumique de biomasse au final. Toutefois, ces valeurs (de PCI et de masse volumique) permettront d'avoir une meilleure compréhension des endroits où se situent les sur- et sous-estimations et donc d'adapter plus rapidement les paramètres lors des tests en laboratoire.

(a) Volume remplis d'eau (b) Volume remplis de boues de karité

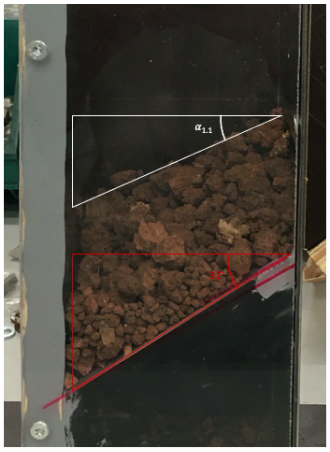
FIGURE 3.5 – Mesure de densité : peser la masse de densité inconnue dans le même volume qu'une masse de densité connue ($\rho_{eau} = 1000$ kg/m^3)

L'analyse de l'**angle de talus** a été réalisée grâce à une maquette du réservoir du prototype dans laquelle le réservoir est incliné à 45 °, a une ouverture de 40 mm et avec la grille est inclinée à 30 °comme illustré à la Figure 3.6. La tendance observée est : $\alpha \approx 20$ °. Il est important de noter que cette analyse comporte énormément d'imprécisions, car la pente de talus est complexe à identifier précisément sur une photo. Cette analyse est donc plus qualitative que quantitative. Le lit de boues ne se répartit pas totalement selon la pente de la grille : il y a plus de boues à gauche qu'à droite. Il donc y a un risque que les charbons soient plus nombreux dans le coin en bas à gauche de la grille et donc qu'il y ait une accumulation de chaleur à cet endroit. De plus, si on force la biomasse à entrer en la poussant, les charbons vont encore plus se concentrer dans le coin gauche. Cette observation est à prendre en compte lors du dimensionnement de la grille : une pente 15° et 30° sont à tester.



(a) Pente du réservoir à 45 °et pente de la grille à 30 °

(b) Ouverture du réservoir à 40 mm



(c) Mesure de l'angle de talus avec Power Point

FIGURE 3.6 – Maquette du réservoir et de la grille pour la conception du prototype

3.2 Dimensionnement prototype

Une grosse partie du travail a été de fixer les dimensions du prototype d'essai pour s'adapter au mieux aux contraintes du projet : combustion complète des boues (peu ou pas d'émission de CO), en tirage naturel (pas de besoin électrique) et alimentée de manière continue (avoir le moins possible de manutention). Sur base de ces contraintes et d'*état de l'art à propos du combustible, de la combustion, et de la conception de brûleurs à petite échelle*, le prototype peut être séparé en six zones dimensionnées séparément et dans l'ordre (de haut en bas) illustré par la Figure 3.7. Les propriétés de boues utilisées dans cette section sont celles renseignées par le Cirad. Des tableaux récapitulatifs de toutes les dimensions citées dans cette section sont disponibles à l'Annexe B dans les Tables

La spécificité du prototype, par rapport au brûleur final, est de mesurer qualitativement et quantitativement l'influence des paramètres de dimensionnement sur la combustion. Pour cela, des aménagement spécifiques (qui ne seront pas sur le brûleur final) ont été implémentés et sont expliqués à la section 3.2.4 de ce chapitre.

3.2.1 Combustion complète des boues : dimensions des conduits d'air primaire et secondaire

L'objectif du prototype étant de brûler les boues de barattage de manière complète, le dimensionnement est d'abord limité pas les caractéristiques physico-chimiques de la combustion des boues. Cette section a donc pour but de lister les contraintes et les valeurs réalistes liées à la combustion complète de la biomasse.

La puissance théorique est fixée à $P_{th} = 10$ kW de boues brutes. Cette valeur a été choisie sur base des audits réalisés dans les PME et sachant que les feux ouverts utilisés sur place ont une efficacité thermique très faible (proche de zéro). L'objectif du prototype étant d'optimiser le rendement, la puissance choisie doit être bien plus basse que celle annoncée par les PME et se rapprocher plus des valeurs typiques pour les brûleurs à

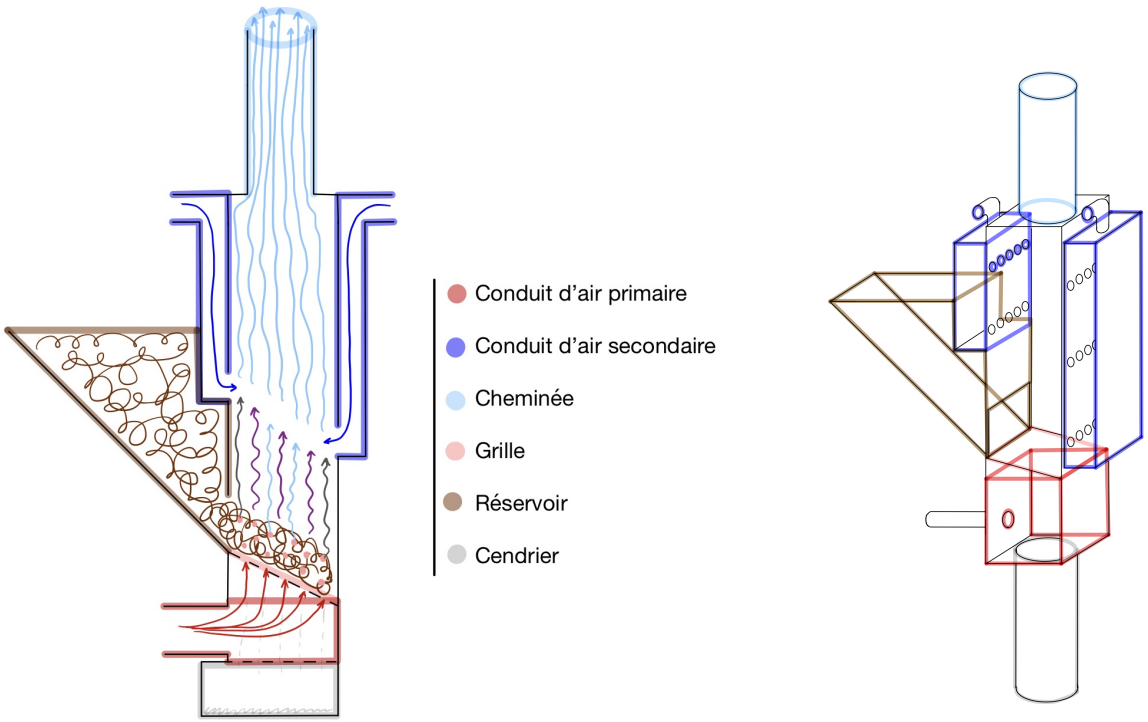


FIGURE 3.7 – Les différentes parties du prototype à dimensionner : les conduites d'air primaire et secondaire, la cheminée, la grille, le réservoir, le cendrier

petite échelle (voir Section 2.3). Il est important de distinguer La puissance théorique de la puissance combustible réelle à cause des imperfections dans l'étanchéité du prototype réel.

Connaissant le PCI des boues brutes, $PCI = 23748$ kJ/kg$_{ar}$, le débit massique se calcule avec l'équation (2.10) : $\dot{m_{comb,th}} = 1,5$ kg/h.

La valeur d'excès d'air est fixée à $\lambda_{th} = 2$ (valeur typique pour les brûleurs à petite échelle, voir Section 2.2.5), c'est une hypothèse posée pour le dimensionnement. La valeur réelle de l'excès d'air sera mesurée avec l'appareil Testo pendant les essais.

Connaissant la densité de l'air à température ambiante, le débit volumique se calcule avec l'équation (2.18) : $\dot{Q_{air,th}} = 20$ m^3/h. Tous les débits d'air sont aussi des valeurs théoriques. Les valeurs réelles seront légèrement différentes en raison des imprécisions des débitmètres et au vent extérieur venant perturber le signal.

La distribution de l'air primaire par rapport à l'air total est fixée à $r_{prim} = 20\%$. Comme mentionné dans la Section 2.2.6, 20% est la valeur standard de ratio d'air primaire/total pour les brûleurs à petite échelle. Les débits d'air théoriques obtenus avec ce ratio sont : $\dot{Q_{prim}} = 4$ m3/h et $\dot{Q_{sec}} = 16$ m3/h C'est une hypothèse faite pour le dimensionnement. En laboratoire, plusieurs valeurs seront testées : 10%, 20% et 30%.

Pour chaque débit d'air, il est nécessaire de dimensionner une boîte à air dont le but est avant tout de ralentir la vitesse de l'air localement pour qu'il se répartisse bien sur la surface des trous et éviter qu'il entre préférentiellement par l'orifice situé le plus au centre.

Chaque débit d'air sera amené par une conduite de dimension standard de type DN25 et positionné pour entrer au milieu de la boîte à air. De plus, les vitesses d'air fixées dans cette section sont des hypothèses afin de calculer les dimensions du prototype sur base de valeurs réalistes.

Air primaire

La vitesse de l'air primaire est fixée à $u_{prim} = 0,1\ m/s$ (air ambiant). L'air primaire arrive dans une boîte à air, située en dessous de la grille, assez grande pour qu'il ralentisse et se mélange. La surface correspondante à la vitesse fixée se calcule :

$$A_{prim} = \frac{\dot{Q}_{prim}}{u_{prim}} \quad [\mathrm{m}^2] \tag{3.2}$$

$$A_{boiteP} = l_{boiteP} \cdot p_{boiteP} \quad [\mathrm{m}^2] \tag{3.3}$$

La largeur, la profondeur et la hauteur de la boîte à air primaire sont fixées pour que la surface théorique (3.2) et celle dimensionnée (3.3) soient équivalentes. Elles doivent aussi être de même ordre de grandeur : $l_{boiteP} = 100$ mm, $p_{boiteP} = 114$ mm et $h_{boiteP} = 114$ mm. Ce qui fait une section : $A_{boiteP} = 114$ cm^2. La largeur et la longueur du foyer vont être fixées pour être équivalentes à celles de la boîte à air primaire : $l_{foyer} = 100$ mm, $p_{foyer} = 100$ mm.

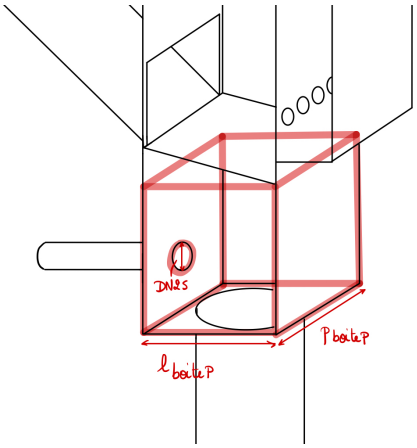


FIGURE 3.8 – Illustration des dimensions liées à l'air primaire

Air Secondaire

La vitesse de l'air secondaire est fixée à $u_{sec} = 6$ m/s. L'air secondaire doit arriver dans le foyer avec une vitesse assez grande pour cisailler et se mélanger assez bien pour brûler tout le gaz qui arrive. Mais la vitesse de celui-ci ne doit pas être trop grande pour que la combustion ait le temps de tout brûler (cinétique chimique de la réaction). Le débit d'air secondaire étant calculé grâce au ratio d'air primaire, la surface des trous d'air secondaire peut être calculée avec l'équation (3.4).

$$A_{sec} = \frac{\dot{Q}_{sec}}{u_{sec}} \quad [\mathrm{m}^2] \tag{3.4}$$

$$A_{trousS} = 2 \cdot n_{sec} \cdot \frac{D_{sec}^2}{4} \quad [\mathrm{m}^2] \tag{3.5}$$

Le nombre (par face) et le diamètre des trous d'air secondaire sont fixés pour avoir assez de

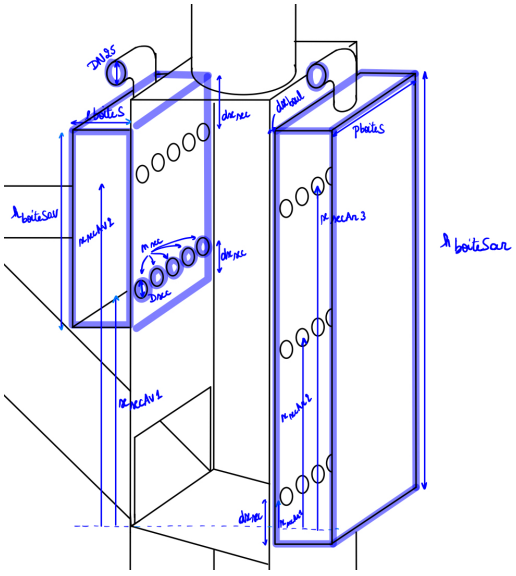


FIGURE 3.9 – Illustration des dimensions liées à l'air secondaire

place pour placer ceux-ci le long de la paroi comme illustré à l'équation (3.5). Pour la surface théorique (3.4) et celle dimensionnée (3.5) : $n_{sec} = 5$ et $D_{sec} = 10$ mm. Ce qui fait une section : $A_{trous} = 7,85$ cm^2.

La position des rangées de trous d'air secondaire est variable pour pouvoir tester l'impact de celles-ci sur la combustion. Sur base de dimensions de brûleur déjà réalisé, et en décalant les rangées avant et arrière pour suivre la pente de la grille (qui varie entre 15 et 30 °) les positions sont fixées par rapport à la base du réservoir : $x_{secAv1} = 165$ mm, $x_{secAv2} = 245$ mm, $x_{secAr1} = 20$ mm, $x_{secAr2} = 125$ mm et $x_{secAr3} = 225$ mm.

La largeur des boîtes d'air secondaire est fixée à $l_{boiteP} = 70$ mm pour que l'air puisse se mélanger. L'espace entre les rangées d'air tout en bas et tout en haut est fixé à $dx_{sec} = 40$ mm pour la boîte avant. La boîte arrière arrive à la même hauteur que la boire avant, afin que les deux tuyaux arrivent au même niveau. Les boîtes d'air ne pouvant pas être soudées (car elles doivent être enlevées pour ajuster les positions d'air secondaire durant les essais) sont boulonnées. Il faut donc prévoir un espace pour mettre ces boulons (de calibre M5) sur la coque : $dx_{boul} = 10$ mm. Les dimensions des boîtes, calculées avec les équations (3.6),(3.7),(3.8), sont : $h_{boiteS,Av} = 160$ mm, $h_{boiteS,Ar} = 305$ mm et $p_{boiteS} = 94$ mm.

$$h_{boiteS,av} = (x_{secAv2} - x_{secAv1}) + 2 \cdot dx_{sec} \quad [\text{mm}] \tag{3.6}$$

$$h_{boiteS,ar} = (x_{secAv2} - x_{secAr1}) + 2 \cdot dx_{sec} \quad [\text{mm}] \tag{3.7}$$

$$p_{boiteS} = l_{foyer} + 2 \cdot dx_{boul} \quad [\text{mm}] \tag{3.8}$$

3.2.2 Tirage naturel : dimensions de la cheminée

Le second objectif du prototype est de tester un appareil de combustion avec un tirage naturel. Celui-ci est possible grâce à l'ajout d'une cheminée pour compenser les pertes de charge dans le brûleur, comme expliqué à la Section 2.2.7.

En fixant une dimension standard pour le diamètre de la cheminée : $D_{cheminee} = 76,1$ mm, la vitesse correspondante est réaliste : $u_{fumees} = 2,26$ m/s. En égalant les Δp, on obtient une hauteur de cheminée : $h_{cheminee} = 491$ mm.

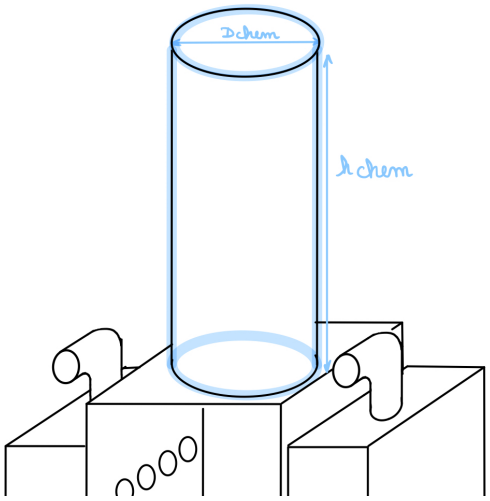


FIGURE 3.10 – Illustration des dimensions liées à la cheminée

Finalement, il a été décidé d'utiliser un aspirateur d'extraction pour compenser les pertes de charges engendrées par les appareils de mesure de débit. La hauteur théorique de la cheminée ne pourra donc pas être vérifiée expérimentalement. Toutefois, une approximation pourra être déduite de la mesure de perte de charge calculée entre le foyer et l'air extérieur (P203A) et

la mesure de température en sortie du foyer (T103A). Plus d'informations sont disponibles à la Section 3.2.4.

3.2.3 Alimentation des boues en continu : dimensions de la grille, du réservoir et du cendrier

Le troisième objectif du prototype est de tester un dispositif permettant d'alimenter le foyer en boues de karité de manière continue. Ce qui implique un dimensionnent spécial au niveau du réservoir, de la grille de combustion et l'ajout d'un cendrier.

La grille

L'inclinaison de la grille a été choisie sur base de l'angle de talus observé ($\alpha_{talus} \approx 20°$) pendant les essais d'écoulement, détaillés à la Section 3.1.2. Il a été décidé de tester deux angles de grille : $\alpha_{grille1} = 15°$ et $\alpha_{grille3} = 30°$. Deux ergots ont donc été fixés pour adapter l'angle de la grille en fonction des résultats obtenus pendant les essais. La largeur de la grille se calcule avec l'équation (3.9) : $l_{grille} = 104$ mm et $p_{grille} = 114$ mm, comme le prototype.

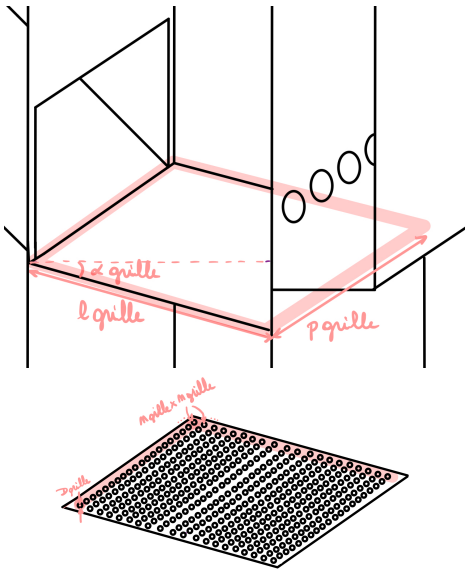


FIGURE 3.11 – Illustrations des dimensions de la grille

$$l_{grille} = \frac{l_{proto}}{\cos(\alpha_{grille})} \quad [\text{mm}] \qquad (3.9)$$

De l'analyse des granulométries des boues (Section3.1.2), il a été décidé de garder uniquement la biomasse de calibre supérieur à 2 mm et de tester deux valeurs de diamètre pour la grille $D_{grille1} = 3$ mm et $D_{grille2} = 5$ mm pour laisser l'air passer, mais éviter que les boues ne tombent trop vite dans le cendrier. Le nombre de trous de chaque grille est déduit de la surface et du diamètre des trous de celle-ci : $n_{D,grille1} \times n_{D,grille1} = 20 \times 20$ trous et $n_{D,grille2} \times n_{D,grille2} = 10 \times 10$ trous.

Le réservoir

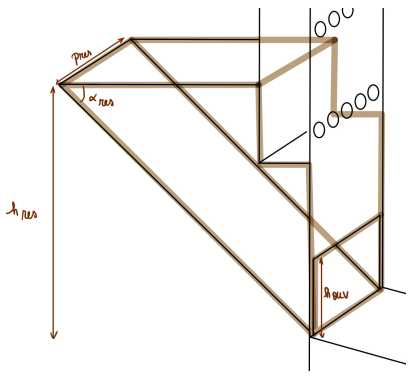


FIGURE 3.12 – Illustration des dimensions du réservoir

La hauteur de l'ouverture du réservoir vers la grille sera un facteur à tester pendant les essais. Une plaque en métal (guillotine) a été installée pour pouvoir ajuster la hauteur d'ouverture du réservoir. Les valeurs qui ont été testées sont : $h_{ouv1} = 40$ mm, $h_{ouv2} = 60$ mm, $h_{ouv3} = 80$ mm.

En ce qui concerne le réservoir, une pente de $\alpha_{grille} = 45°$ a été fixée. Cette valeur d'angle permet aux boues de descendre naturellement dans le foyer mais ne laisse pas trop d'ouverture pour éviter l'arrivée d'air incontrôlé

dans le foyer.

Comme pour les boîtes d'air secondaire, le réservoir est boulonné, il faut donc prévoir l'espace des boulons en dimensionnant la profondeur du réservoir comme à l'équation (3.8) : $p_{res} = 94$ mm

La hauteur du réservoir est fixée à $h_{res} = 210$ mm. Cette valeur a été posée pour correspondre au débit volumique de boue pour une heure de fonctionnement mais rester proportionnée par rapport aux dimensions du foyer. En effet, connaissant le débit massique de boues, le débit volumique peut être calculé avec l'équation (3.10) et donc calculer son volume avec l'équation (3.11) : $\dot{Q_{comb}} = 5,55$ dm^3/h et $V_{res} = 1,51$ dm^3

$$\dot{Q_{comb}} = \frac{\dot{m_{comb}}}{\rho_{comb}} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \tag{3.10}$$

$$V_{res} = \frac{h_{res}^2}{2} \cdot p_{res} - (h_{res} - (x_{secAv1} - dx_{sec})) \cdot p_{boiteS} \cdot l_{boiteS} \quad [\text{m}^3] \tag{3.11}$$

Le cendrier

La hauteur et le diamètre du cendrier sont, respectivement $h_{cendrier} = 316$ mm et $D_{cendrier} = 88,9$ mm. L'objectif du cendrier étant d'éviter de devoir évacuer les cendres en plein milieu d'un essai, celui-ci doit pouvoir contenir toutes les cendres d'un jour d'essai. Le taux de cendre dans les boues étant très faible ($4,1$ %$anydre$), les dimensions fixées permettent 8h de combustion.

Pour assurer l'étanchéité à l'air et permettre l'évacuation des cendres entre les essais, une bride d'étanchéité a été ajoutée en bas du cendrier. Le but du prototype étant de mesurer le plus précisément possible les flux d'air, le prototype doit donc être le plus étanche à l'air possible.

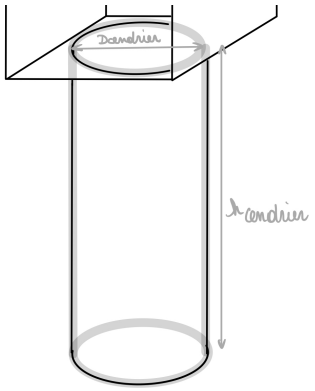


FIGURE 3.13 – Illustration des dimensions du cendrier

3.2.4 Contrôle de la combustion : instrumentations et équipements spécifiques

Comme expliqué précédemment, l'objectif du prototype est d'*étudier la combustion des boues de barattage*. Pour cela, il est donc primordial de sélectionner les instruments adaptés à la mesure des paramètres spécifiques à la combustion (températures, dépressions, débits d'air, CO et excès d'air), ainsi que les équipements pour contrôler un maximum de paramètres.

Équipements de mesure

Afin d'obtenir des données quantitatives sur la combustion des boues, les équipements de mesures ont été ajoutés. La première étape est d'identifier les paramètres qui varient lors

de la combustion et ou les mesurer. La température : sur la grille pour voir si le matériau utilisé est une contrainte (T101A), juste au-dessus du lit pour mesurer la température de la combustion primaire (T102A) et à l'entrée de la cheminée pour mesurer la température des fumées brûlées (T103A). Les pertes de charges : entre l'air ambiant et le dessous de la grille pour mesurer les pertes de charges induites par le débitmètre (P201A), entre le dessous et le dessus du lit pour voir si un tirage naturel sera possible sans débitmètre (P202A), entre le début de la cheminée et l'air ambiant pour mesurer la force motrice de l'aspirateur d'extraction (P203A). Les débits d'air primaire (F301A), secondaire avant (F302A) et secondaire arrière (F303A), chacun d'eux régulés par une vanne papillon, respectivement V001A, V002A, V003A. Des piquages ont été réalisés sur deux faces du brûleur pour, d'un côté, les thermocouples et de l'autre côté, la mesure des dépressions. Un débitmètre et une vanne papillon ont été insérés à l'entrée de chaque tuyau d'air. Le plan PI&D de ces piquages est représenté à la Figure 3.16. Un piquage additionnel a été réalisé en haut de la cheminée pour insérer l'appareil Testo qui mesure la composition des fumées en monoxyde de carbone et en excès d'air.

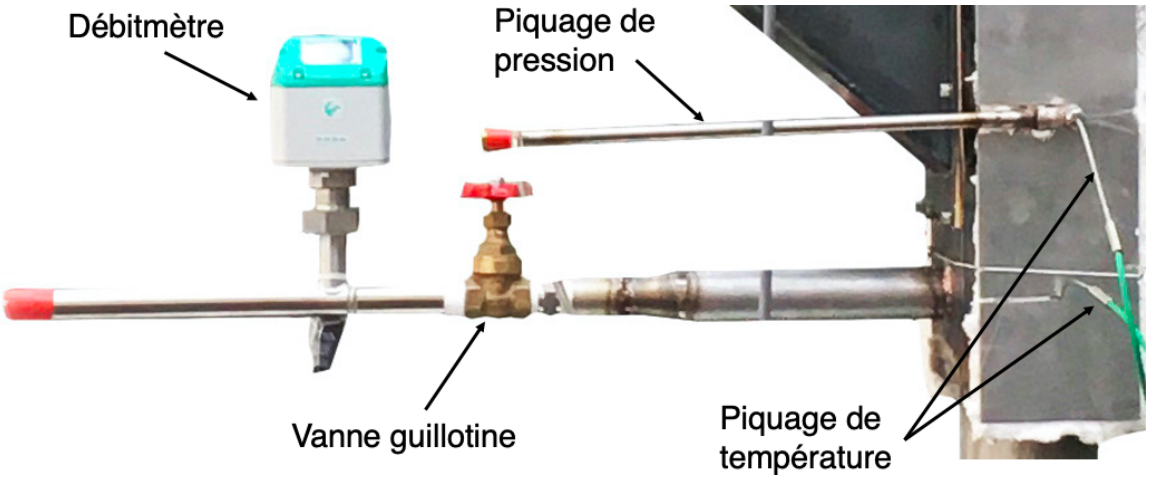


FIGURE 3.14 – Photos des appareils de mesure LabView représenté sur le P&ID.

Le plan P&ID (*Piping & Instrumentation Diagram*) reprend l'ensemble des piquages : leur localisation, leur nom, leur fonction. Il est accompagné d'un document à l'Annexe C qui reprend les unités et valeurs calibrer les mesures. Ce sont ces deux documents qui ont été communiqués aux techniciens pour élaborer les données utiles au logiciel "LabView" utilisées pour transmettre et enregistrer les mesures.

FIGURE 3.15 – Bac de boues (1 par essais)

Pour mesurer le débit de boues, des bacs pré-pesés, avec une balance précise au gramme près, sont utilisés. Ils sont remplis avec environ 2 kg de boues tamisées avec calibre supérieur à 2 mm. Un bac différent est utilisé pour chaque essai. La Figure 3.15 représente le volume et le calibre typique des boues de barattage utilisées durant les expérimentations. Cette mesure est importante à mentionner, pas pour sa technologie, mais pour son importance dans la caractérisation de la combustion. En effet, c'est avec la masse de boues brûlées que la puissance combustible du brûleur va être calculée.

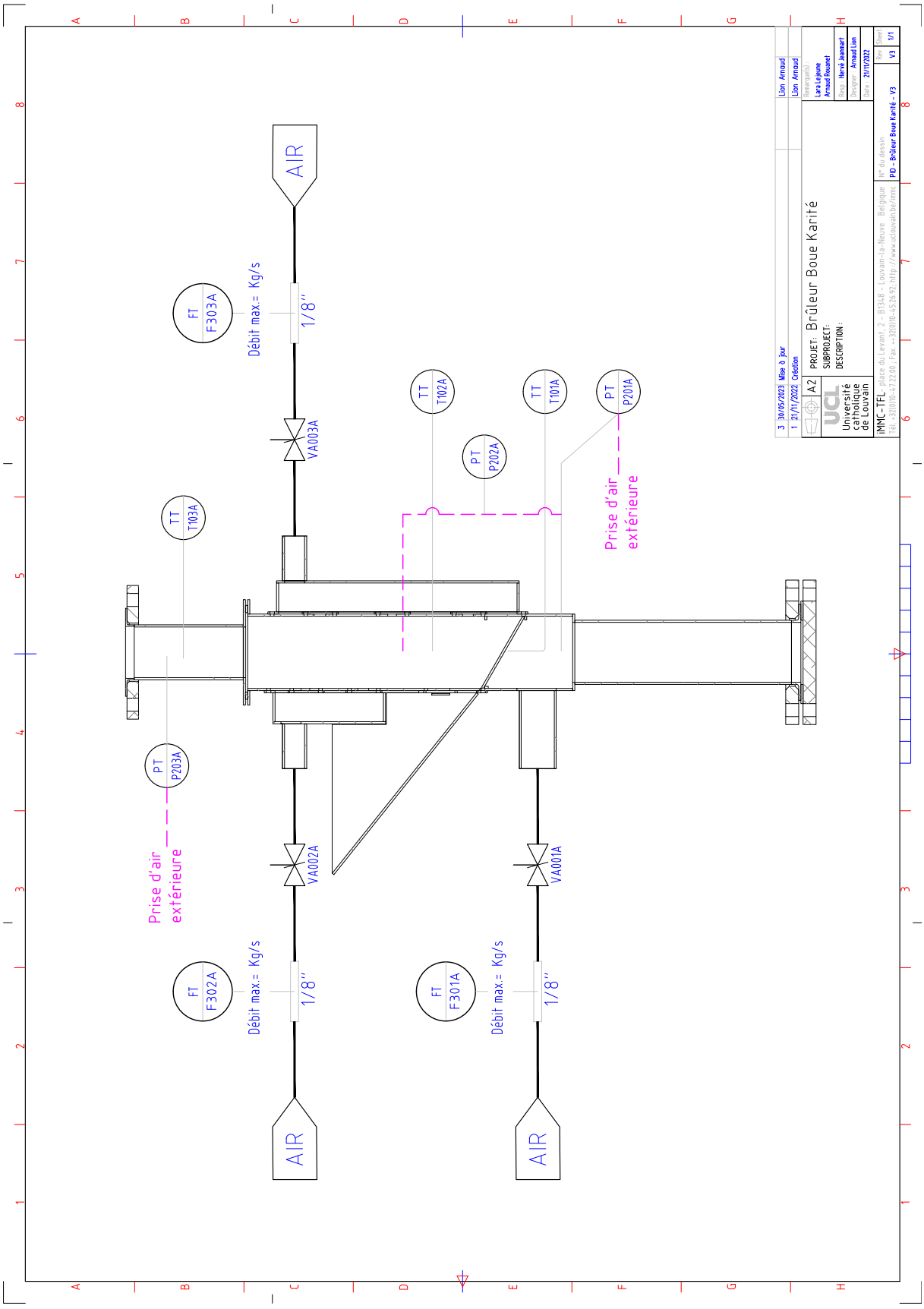


FIGURE 3.16 – P&ID du prototype Piquages pour les températures T1O1A, T102A, T102A

Équipements de gestion opérationnelle

Lors des essais, certaines manipulations seront nécessaires pour obtenir les conditions de combustion voulues. Elles ne peuvent pas être quantifiées précisément mais feront partie intégrante de l'interprétation de chaque essai. L'objectif du brûleur final étant de permettre une maintenance simple et stable à l'utilisateur.

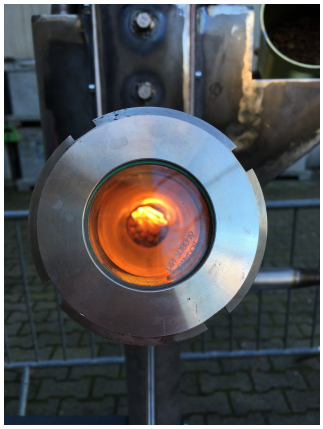
Un support en métal (voir Figure 3.17b) était nécessaire pour stabiliser et porter le prototype et tous ses équipements. Il a été placé sur une palette transportable avec un transpalette. Car les essais se font à l'extérieur pour la sécurité (fumées chaudes et toxiques).

L'installation des débitmètres impliquant des grosses pertes de charge, l'ajout d'un ventilateur d'extraction devenait obligatoire pour compenser cette différence de pression (qui n'existera pas dans le dispositif final car les débitmètres n'y seront pas). Une grille protectrice a été placée à la sortie du ventilateur vu le rejet de cendres volantes, encore chaudes, à la sortie de ce dernier. De plus, après quelques essais, une vanne de dilution a été ajoutée car l'aspirateur engendrait une puissance combustible trop élevée, difficile à suivre en même temps que la gestion de tout l'équipement. La Figure 3.17a montre l'aspirateur, la grille protectrice et la vanne de dilution qui ont été ajoutés à la cheminée de 500 mm de hauteur. Une petite cheminée a été laissée pour y mettre les piquages nécessaires (T103A et Testo).

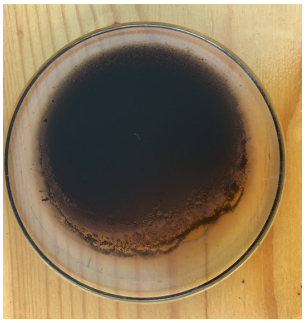
Une vitre en Pyrex donnant sur le lit de combustion a été ajoutée sur le côté du prototype. De cette manière, il est aisé de voir comment se comporte la combustion des charbons et s'il y a une flamme. Cette vitre facilite aussi la gestion, en permettant de comprendre plus rapidement ce qu'il se passe dans le foyer en cas de problème. La vitre est placée au bout d'un tube de 50 mm de diamètre. Une fine couche d'azote contre la vitre est nécessaire pour empêcher la condensation des fumées sur cette dernière et observer correctement la combustion comme le montre les Figures 3.17c et 3.17d.

(a) Aspirateur, grille et vanne de dilution

(b) Plan SolidWorks du support en métal



(c) Vitre en Pyrex

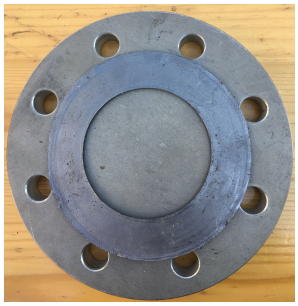


(d) Vitre en Pyrex encrassée à cause de la condensation des fumées

FIGURE 3.17 – Photos de quelques équipements de gestion opérationnelle

L'étanchéité globale du prototype est assurée grâce à des joints en céramique (voir Figure 3.18a) et des boulons de type M5 pour fixer les parties qui peuvent être détachées. En effet, les deux boîtes à air secondaire n'ont pas pu être soudées car elles ont besoin d'être détachables afin d'ajuster les hauteurs d'injection d'air ou de faire varier les dimensions de la grille. Le réservoir non plus n'a pas pu être fixé car il doit pouvoir s'ouvrir pour évacuer les cendres si besoin.

Un couvercle avec des joints en Teflon a été nécessaire pour diminuer la quantité d'air incontrôlé passant par le réservoir. Un clapet a été ajouté, toujours pour diminuer l'effet de l'arrivée d'air incontrôlé, pendant le remplissage cette fois-ci. Les deux faces du couvercle sont visibles aux Figures 3.18b et 3.18c. Un tisonnier a été utile pour aider l'écoulement les boues (voir Figure 3.18d). Un verre de $0,34\text{dm}^3$ a été utilisé pour quantifier le débit pendant les essais entre chaque remplissage.



(a) Joint en céramique de la bride d'étanchéité du cendrier

(b) Couvercle avec ouverture

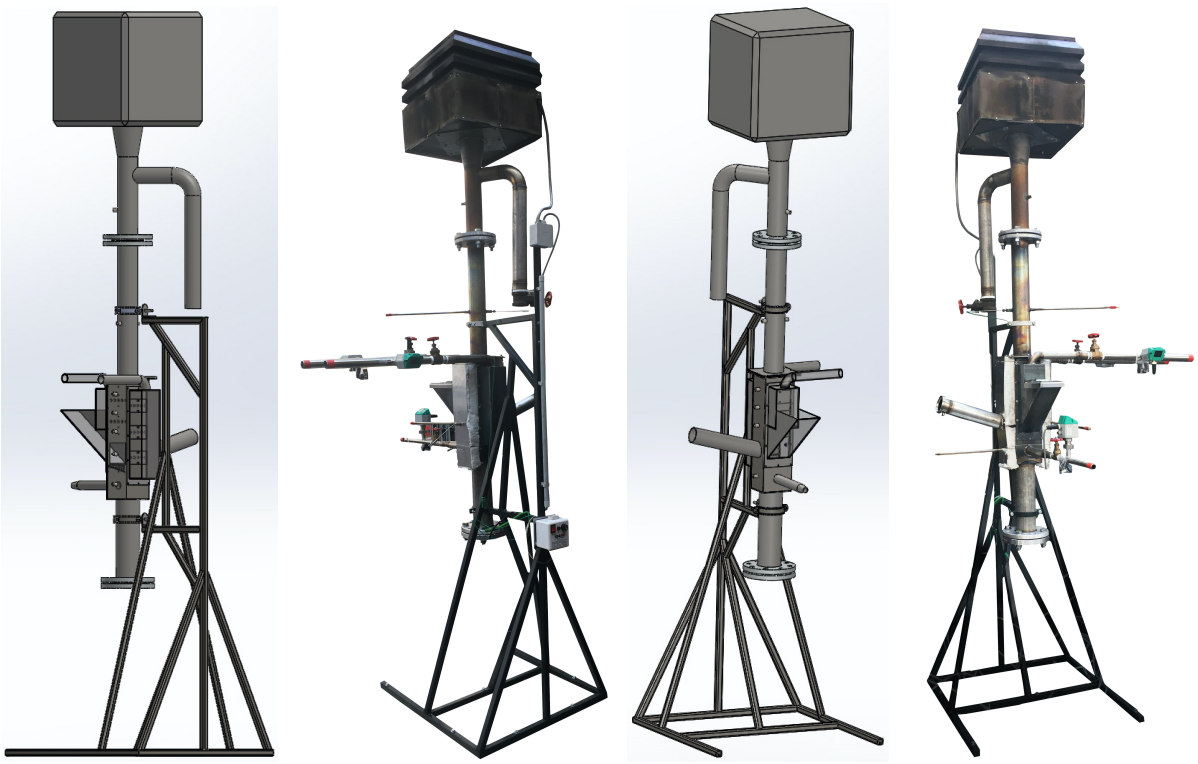
(c) Couvercle avec joints en Téflon

(d) Tisonnier

FIGURE 3.18 – Photos de quelques équipements de gestion opérationnelle

3.2.5 Vue d'ensemble du prototype dimensionné

L'ensemble du dimensionnement fourni dans cette section a permis de créer des plans SolidWorks pour la construction du prototype en laboratoire. La Figure 3.19 présente deux vues de comparaison entre les plans de modélisation SolidWorks et le brûleur fabriqué en laboratoire.



(a) Modélisation SolidWorks (vue 1) (b) Photo prise en laboratoire (vue 1) (c) Modélisation SolidWorks (vue 2) (d) Photo prise en laboratoire (vue 2)

FIGURE 3.19 – Vue d'ensemble du prototype final. Modélisation vs réalité.

3.3 Planification expérimentale

Lorsqu'il s'agit d'optimiser un procédé industriel, tel la combustion des boues de karité, la *planification expérimentale* se révèle être un outil précieux. Elle fournit une approche méthodologique ainsi que des techniques pour sélectionner les plans d'expériences les plus appropriés, permettant ainsi de maximiser les résultats de chaque expérimentation tout en minimisant le coût [16]. Cette section va s'atteler à détailler les facteurs et les réponses choisies pour l'*essai sur le prototype du brûleur de boues de karité.*

3.3.1 Les facteurs

L'objectif du brûleur expérimental, dimensionné dans la Section 3.2, étant de déterminer les effets des paramètres de dimensionnement sur la qualité et l'efficacité de la combustion dans des conditions réelles, ce sont ces paramètres de dimensionnement qui formeront le domaine des *facteurs* (paramètres de l'expérience qui vont varier). Les contraintes principales étant le temps (3 mois) et la météo (sec car on brûle dehors pour des raisons de sécurité), le domaine des facteurs est trop vaste. Seulement les paramètres les plus influents et les moins coûteux seront sélectionnés. La stratégie expérimentale qui permet de réduire le nombre d'essais est une division du domaine des facteurs en deux sous-domaines étudiés séquentiellement.

Le sous-domaine lié au flux de biomasse, sera optimisé avant le second afin de minimiser les coûts. En effet, les paramètres qui le composent demandent plus de manutention pour

pouvoir modifier leurs valeurs, c'est-à-dire, déboulonner la paroi avant du prototype. Dans ce sous-domaine, les facteurs retenus sont les suivants :

- La hauteur d'ouverture du réservoir : $h_ouv = 40$, 60 ou 80 mm
- La cadence d'alimentation des boues : en continu (réservoir toujours plein) ou en discontinu (couvercle toujours fermé).
- L'angle d'inclinaison de la grille : $\alpha_g = 15$ ou 30 °
- Le diamètre des trous de la grille : $d_g = 3$ ou 5 mm

Le second sous-domaine contient les facteurs liés aux flux d'airs. Il est plus facilement modifiable grâce aux vannes papillons. Toutefois, les valeurs seront moins précises (courants d'air dans les tuyaux et bruit dans le signal du débitmètre). Dans ce sous-domaine, les facteurs retenus sont les suivants :

- Le débit d'air total : $\dot{Q_{tot}} = 20$, 25, 10 ou 5 m^3/s
- Le ratio d'air primaire sur l'air total : $r_{prim} = 10$, 20 ou 30 %
- Le ratio d'air secondaire avant sur l'air secondaire total : $r_{sec} = 0$, 50 ou 100 %

TABLE 3.1 – Matrice d'expériences du prototype avec les valeurs réelles des facteurs testés. En brun, les facteurs liés au lit de biomasse. En rouge, les facteurs liés aux flux d'airs.

facteurs unités	isolant	D grille mm	a grille °	h_ouv mm	cadence	Q_tot m3/h	r p/total %	r sec av/tot %
valeurs	0=rien	3	15	40	continu =	20,00	10	0
	1=foyer	5	30	60	réservoir	15,00	20	50
	2=foy+chem			80	tjrs plein	10	30	100
					discontinu =		40	
					couvercle		50	
					tjrs fermé			
essai								
1	0	5	15	40	continu			
2	0	5	15	40	continu			
3.1	0	5	15	40	continu	19,41	21%	50%
3.2	0	5	15	40	continu	19,93	22%	49%
3.3	0	5	15	40	continu	21,19	22%	48%
4.1	2	3	15	40	continu	22,85	16%	51%
4.2	2	3	15	40	continu	17,95	18%	46%
5.1	1	3	15	60	continu	19,82	20%	47%
5.2	1	3	15	60	continu	20,75	11%	48%
6.1	1	3	15	60	continu	14,88	22%	48%
6.2	1	3	15	60	continu	14,29	9%	45%
7.1	1	5	30	80	discontinu	9,64	14%	19%
7.2	1	5	30	80	discontinu	9,39	13%	19%
8.1	1	5	30	80	continu	15,42	16%	47%
8.2	1	5	30	80	continu	11,64	19%	48%
9.1	1	5	30	80	continu	12,03	23%	1%
9.2	1	5	30	80	continu	13,58	21%	100%
10.1	1	5	30	80	continu	10,24	30%	50%
10.2	1	5	30	80	continu	5,28	31%	50%

La Table 3.1, reprend la liste complète des essais du plan expérimental dans l'ordre de leur réalisation. Les trois premiers jours d'essais, ont permis de valider le fonctionnement du brûleur : la biomasse est brûlée. D'abord sans aucun équipement, ensuite avec de l'air sous pression, enfin avec l'aspirateur d'extraction et les outils LabView. Les essais de 1 à 5 sont des essais préliminaires. Ils ont servi de pré-analyse afin de définir les conditions de base du plan d'expérimentation et ainsi diminuer la variabilité expérimentale. Les valeurs

contenues dans de ce plan d'essais sont les vraies valeurs des conditions de laboratoire. C'est pourquoi, en ce qui concerne les flux d'airs, les valeurs diffèrent légèrement des valeurs "objectifs", listées précédemment.

3.3.2 Les réponses

Chaque essai se déroule dans des conditions les plus uniformes possibles (listées à la Section 4.1) et une fois que la température du brûleur est stabilisée (compter 1h). Les *réponses* seront les valeurs mesurées par les outils du prototype cités dans la section 3.2.4.

— Le débits de boues : m^3/h (manuel)
— L'intervalle de temps : s (manuel)
— La température de la grille : °C (électronique T101A)
— La température au-dessus du lit : °C (électronique T102A)
— La température des fumées : °C (électronique T103A)
— La perte de pression entre l'extérieur et le dessous du lit : Pa (électronique P201A)
— La perte de pression entre le dessous et le dessus du lit : Pa (électronique P202A)
— La perte de pression entre la cheminée et l'extérieur : Pa (électronique P203A)
— Le monoxyde de carbone dans les fumées : ppm (électronique Testo)
— L'excès d'air dans les fumées : - (électronique Testo)

Ces réponses sont à analyser après chaque essai pour cibler les facteurs les plus influents et rectifier les valeurs à tester de ces derniers.

Chapitre 4

Résultats et discussion

En raison de la multitude de facteurs à prendre en compte, il n'a pas été possible de tester l'influence de chaque facteur individuellement sur une période de trois mois (les outils de mesure sont arrivés fin janvier). De plus, la durée des tests a été réduite en raison des conditions météorologiques défavorables en février et mars. Malgré ces contraintes, une *exploration qualitative du comportement du brûleur* a été réalisée, couvrant un large éventail de facteurs. En utilisant les mesures des essais réussis, une *analyse quantitative* a été effectuée, permettant d'identifier des corrélations avec les formules théoriques.

4.1 Exploration qualitative du comportement du brûleur

La première observation à faire est que le bruleur marche. Les boues sont brûlées. on observe une flamme dans tous les essais. Concernant l'aspirateur, les premiers essais, sans appareil de mesure et sans forcer le tirage ont permis de mettre en valeur son utilité. En effet lorsqu'on a ajouté de l'air sous pression (on "pousse" l'air au lieu de le "tirer" avec l'aspirateur, mais c'est le même objectif), la température globale avait déjà augmenté de 100 °par rapport à l'essai sans forcer l'air. Mais il n'y avait pas encore d'appareil de mesure pour quantifier cela. Comme il n'y a pas de cheminée sur le prototype, il y a donc besoin de compenser les pertes de charges par un autre moyen : l'aspirateur d'extraction. Par contre, des braises volantes (voir Figure 4.1b) venant des particules imbrûlées, ressortent de l'aspirateur lorsqu'on ouvre le couvercle pour alimenter le brûleur en biomasse fraîche. L'apport d'air incontrôlé par l'ouverture du réservoir est trop important et l'air ne se mélange plus bien avec le gaz de pyrolyse et le goudron ne brûle pas.

Concernant le reste de l'outillage, le thermocouple qui mesure la température de grille (T102A) a vite été mis hors service. Par contre, les vannes guillotines, couplées aux débitmètres sont efficaces pour régler les débits d'air à la valeur voulue. La Figure 4.1a compare les valeurs voulues à celles obtenues. Ce dispositif est donc concluant pour contrôler le flux d'air par les tuyaux spécifiquement conçus pour ça.

De l'isolation a été ajoutée sur les parois du foyer. Lors des premiers essais, malgré les fumées chaudes mesurées (400 °C),les parois du foyer se refroidissaient très vite au contact de l'air froid (premiers essais en février). La caméra thermique n'indiquait pas plus de 200 °C et les phases de transitions étaient très longues ; dégagement de fumées de pyrolyses (blanches, opaques et odorantes) pendant une dizaine de minutes à chaque

		OBJECTIF			MESURES	
	Q_tot	r p/total	r sec av/tot	Q_tot	r p/total	r sec av/tot
	m3/h	%	%	m3/h	%	%
3.1	20,00	20	50	19,41	21%	50%
3.2	20,00	20	50	19,93	22%	49%
3.3	20,00	20	50	21,19	22%	48%
4.1	20,00	20	50	22,85	16%	51%
4.2	20,00	20	50	17,95	18%	46%
5.1	20,00	20	50	19,82	20%	47%
5.2	20,00	10	50	20,75	11%	48%
6.1	15,00	**20**	50	14,88	22%	48%
6.2	15,00	**10**	50	14,29	9%	45%
7.1				9,64	14%	19%
7.2				9,39	13%	19%
8.1	**15,00**	20	50	15,42	16%	47%
8.2	**10,00**	20	50	11,64	19%	48%
9.1	15,00	20	**0**	12,03	23%	1%
9.2	15,00	20	**100**	13,58	21%	100%
10.1	**10,00**	30	50	10,24	30%	50%
10.2	**5,00**	30	50	5,28	31%	50%

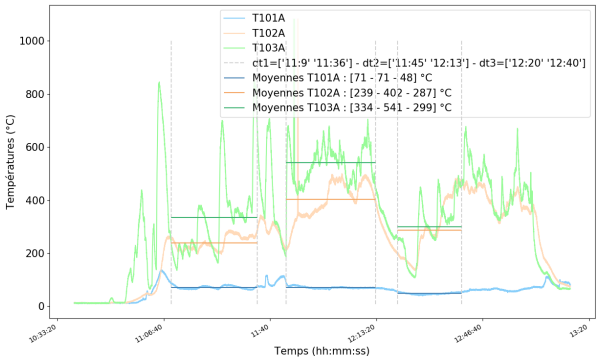
(a) Comparaison des débits d'air "objectifs" et "mesurés"

(b) Braises "volantes" sortant de l'aspirateur d'extraction

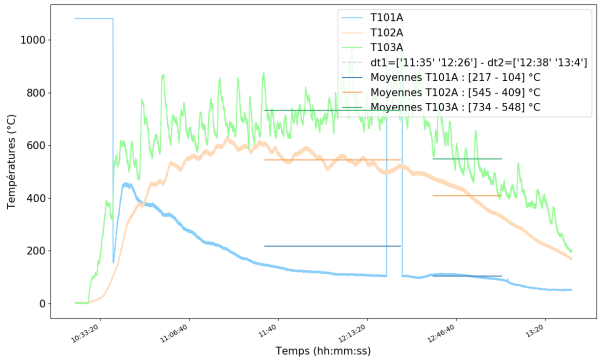
(c) Isolation du foyer

FIGURE 4.1 – Illustration des adaptations du dimensionnement du brûleur

ajout de biomasse fraîche. L'ajout de 5 cm de "Ceramic Blanquet", visible à la Figure 4.1c, a donc permis de stabiliser les transitions et accélérer la phase de démarrage. De plus cette isolation peut être assimilée aux briques entourant les foyers utilisés au Burkina-Faso à présent. On peut observer à la Figure 4.2a, que, malgré des pics à 800 °, le brûleur ne parvient pas à augmenter la température de manière stable. Il y a trop de pertes de chaleur à travers les parois. Pour cet essai, on observe aussi que la phase démarrage est très longue. Une faible stabilisation de la température se produit au bout d'une heure mais chute rapidement. Une fois l'isolant ajouté, à la Figure 4.2b, on observe des températures plus hautes mais surtout plus stables. Outre l'isolation, il faut noter que l'ouverture du réservoir a augmenté de 20mm entre les deux essais.



(a) Sans isolation et avec $h_{ouv} = 40mm$ (E3)

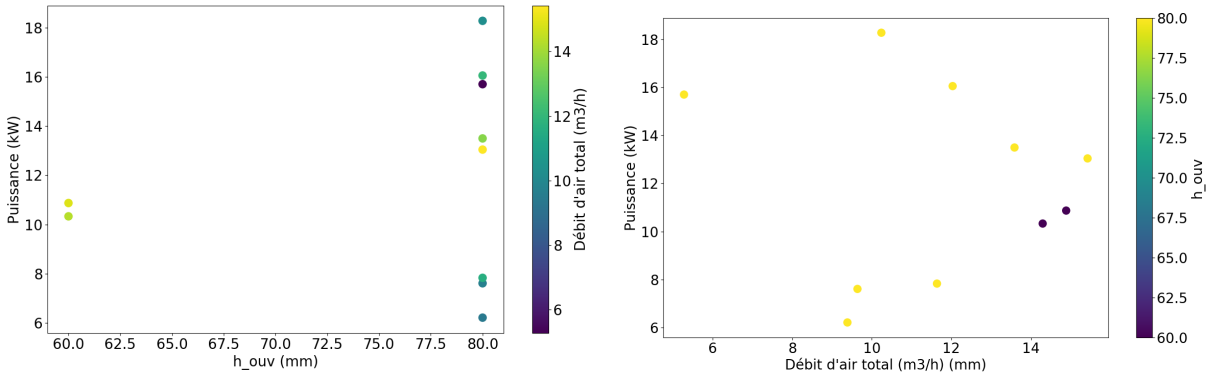


(b) Avec isolation et avec $h_{ouv} = 40mm$ (E5)

FIGURE 4.2 – Mesure de la température dans le brûleur

La hauteur d'ouverture du réservoir était initialement à $h_{ouv} = 40mm$. Après des essais préliminaires sur le prototype en marche avec cette hauteur, les tests ont révélé un problème d'écoulement des boues. Il y avait besoin de tisonner souvent (toutes les 2 minutes). En plus de complexifier la maintenance du brûleur, ce besoin de tison récurrent engendrait une diminution de l'uniformité et de la stabilité des résultats. Il a donc été décidé d'ouvrir à $h_{ouv} = 60mm$. Le même problème s'est répété, plus légèrement. On

devait tisonner toutes les 4 minutes mais un problème de combustion dans la trémie est survenu. Il a donc été décidé d'augmenter encore la hauteur de l'ouverture du réservoir à $h_{ouv} = 80mm$. Ce fut une erreur car cela cause une aspiration d'air par la trémie qui entraîne les boues avec elle. Le réservoir n'étant déjà pas très grand, dès que la biomasse est brûlée et donc que le réservoir diminue en volume l'air s'engouffre par le trou, l'effet "bouchon" de la biomasse tassée dans le réservoir n'est plus présent. La Figure 4.3a montre, que, lors des derniers essais à des débits d'air très faibles, bien que le débit d'air total soit deux fois plus faible que lorsque le réservoir était ouvert à 20 mm en moins, les puissances de combustibles sont doublées. Ce n'était pas le résultat voulu

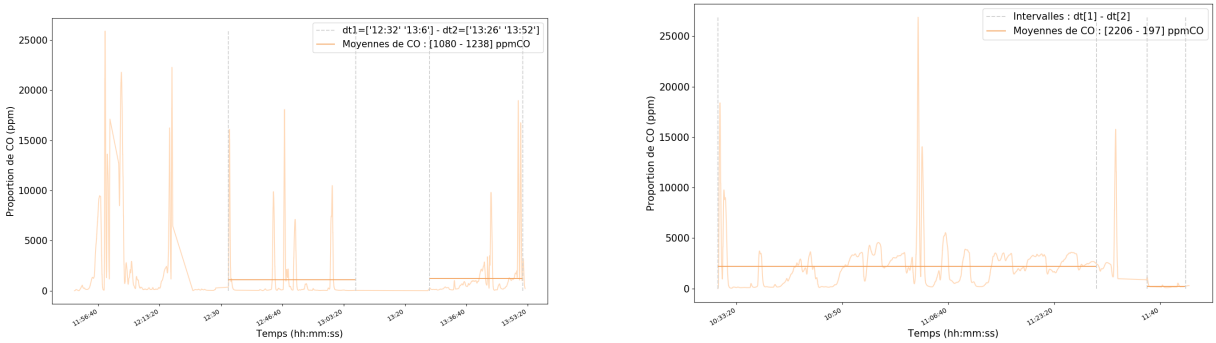


(a) Puissances en fonction de l'ouverture du réservoir et du débit total d'air

(b) Puissances en fonction de l'ouverture du réservoir et du débit total d'air

FIGURE 4.3 – Puissances combustibles en fonction de l'ouverture du réservoir et du débit total d'air avec $\alpha_g = 30°$, $d_g = 5mm$ et $h_{ouv} = 80mm$

Un essai a été réalisé avec le réservoir fermé et l'effet sur les émissions de CO est non négligeable. Bien que les moyennes ne soient pas si différentes, la Figure 4.4 montre que, à réservoir fermé il y a beaucoup moins de pics de polluants. L'alimentation en continu et part le haut pose donc un problème au niveau des émissions de CO.



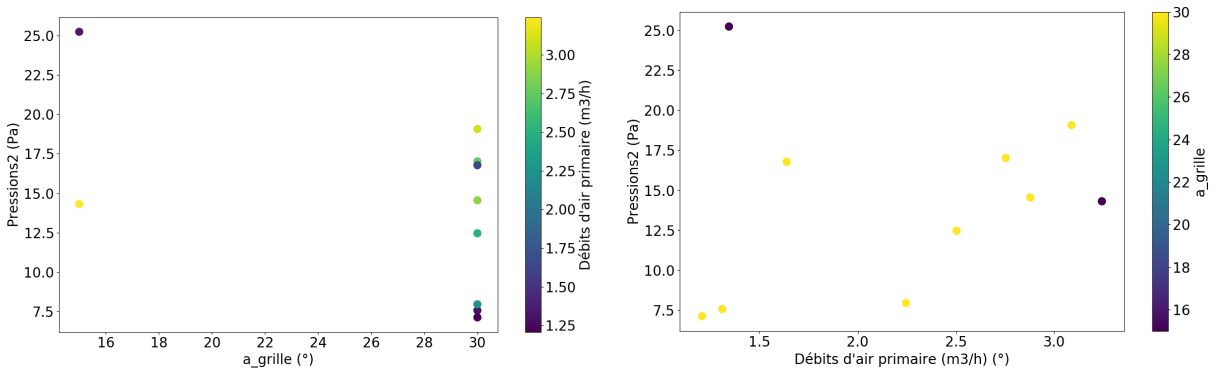
(a) En alimentation continue (E8)

(b) En alimentation par série (E7)

FIGURE 4.4 – Mesure des émissions de CO avec $\alpha_g = 30°$, $d_g = 5mm$ et $h_{ouv} = 80mm$

Inclinaison grille augmente les pertes de charges

Les dimensions des trous de la grille ne semblent pas avoir d'importance sur la combustion. Lorsqu'il n'y avait pas d'isolation, il semblait que la biomasse tombait vite.



(a) Dépression à travers le lit de biomasse en fonction de l'inclinaison de la grille et du débit d'air primaire.

(b) Dépression à travers le lit de biomasse en fonction de l'inclinaison de la grille et du débit d'air primaire

FIGURE 4.5 – Dépression à travers le lit de biomasse en fonction de l'inclinaison de la grille et du débit d'air primaire

Mais lorsqu'on a ajouté l'isolation, un problème d'évacuation des cendres est arrivé.C'est pourquoi le diamètre des trous à 5 mm est à garder. La formation de machefer

Les boues de barattage contiennent encore de l'huile. Cette huile va pyrolyser et brûler comme les volatiles. Or, lorsqu'on n'a pas une bonne combustion secondaire, des morceaux de cette huile qui se retrouvent dans l'air et ça forme des acides à longues chaîne qui sont particulièrement odorants. Cela cause un autre problème pour les expérience : ça encrasse l'appareil Testo.

La quantité d'air total ne semble pas avoir beaucoup d'effet sur la puissance car l'air incontrôlé venant du réservoir est responsable

Le ratio de l'air primaire sur l'air total est optimum à 20 %. en testant le rapport 10% on s'est retrouve avec de la combustions ans le réservoir, l'arrivée d'air primaire nétant pas assez forte, la biomasse tire l'air incontrôlé du réservoir pour brûler. Le rapport 30% lui est ingérable. En effet c'est l'air primaire qui va influencer la puissance de la combustion en existant la pyrolyse. Lors des essais à 30% d'air primaire, les puissances étaient de l'ordre 15kW et on devait ajouter deux verres toutes les " minutes.

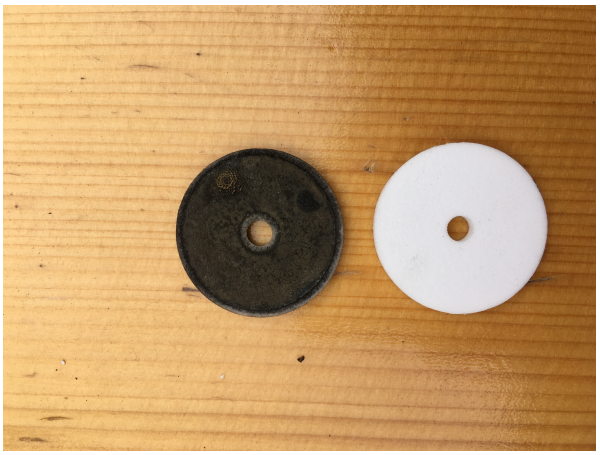
Quant au ratio de l'air secondaire il ne semble pas avoir de grosse influence sur les résultats de la combustion

4.2 Analyse quantitative des essais réussis

Le essais valides sont les essais 6.1,7.1, 7.2, 8.1, 8.2, 9.1, 9.2, 10.2

4.3 Réflexions pour un plus grand brûleur

Morceaux de mâchefer accumulés sur la grille après le refroidissement du brûleur avec $\alpha_g = 30°$, $d_g = 5mm$ et $h_{ouv} = 80mm$ (E7 à 10)



Filtre encrassé de l'appareil Testo après 13 minutes dans le brûleur avec $\alpha_g = 30°$, $d_g = 5mm$ et $h_{ouv} = 80mm$ (E10)

FIGURE 4.6

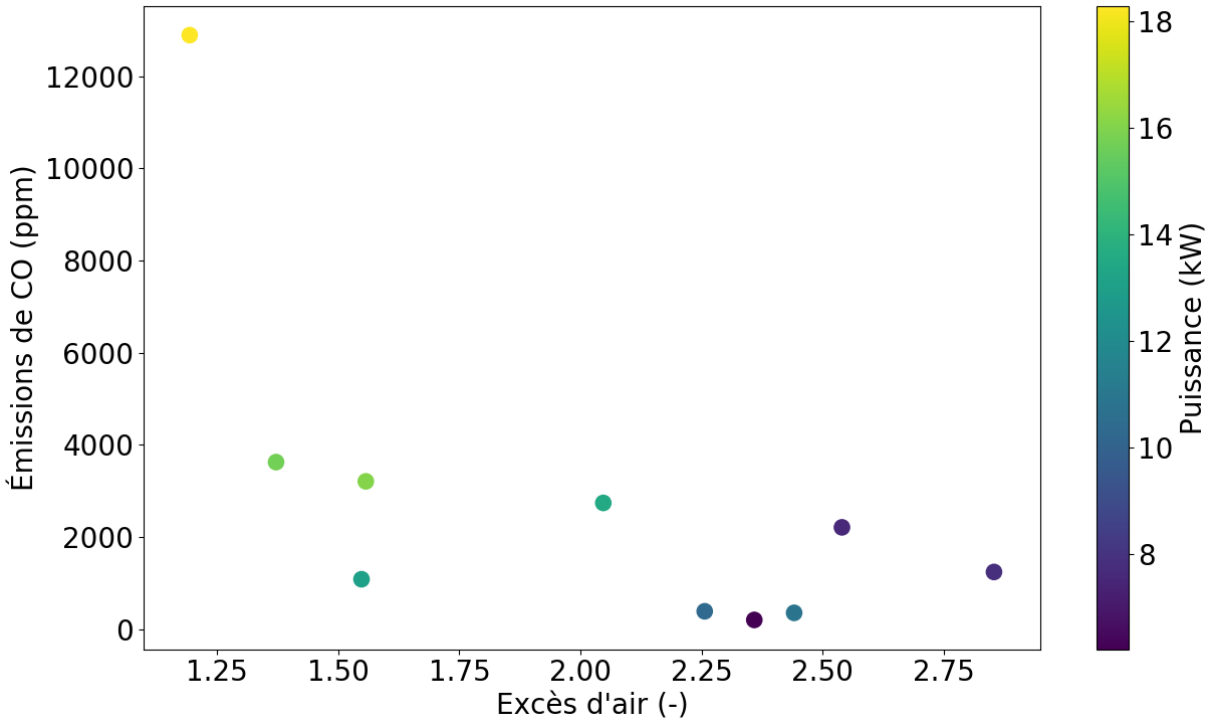


FIGURE 4.7 – Émission de CO en fonction de lambda

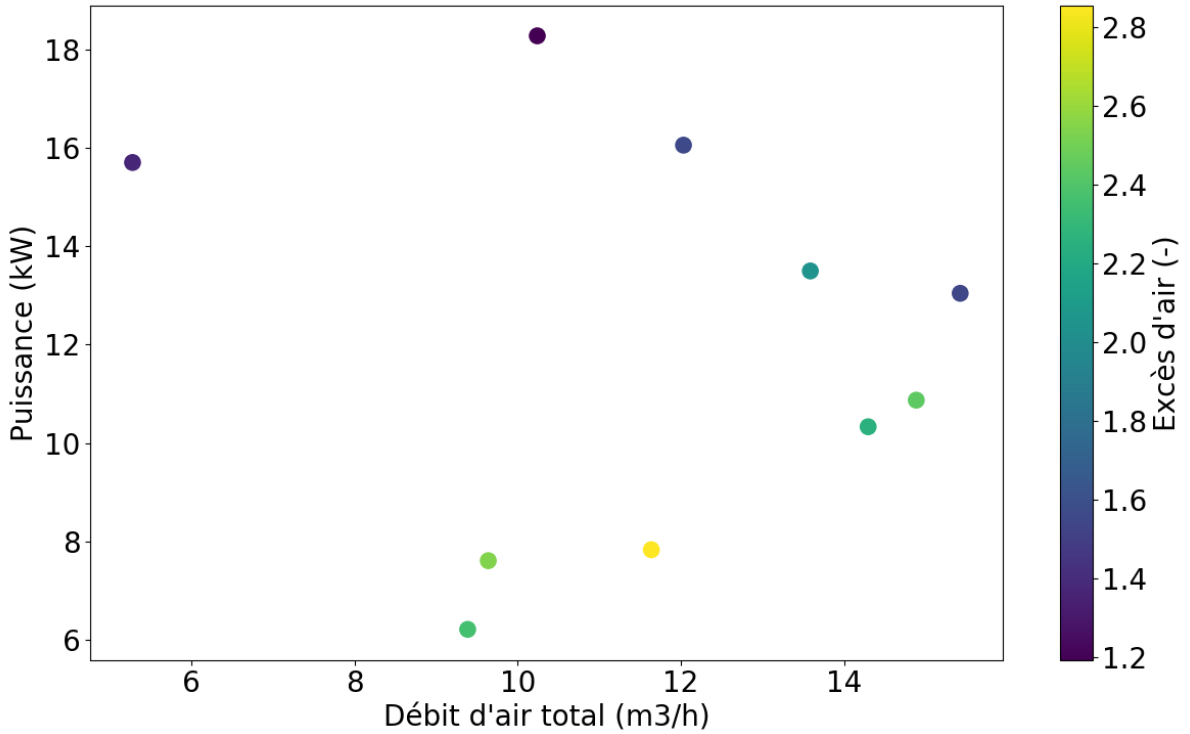


FIGURE 4.8 – Puissances combustible en fonction du débit d'air total et de lambda

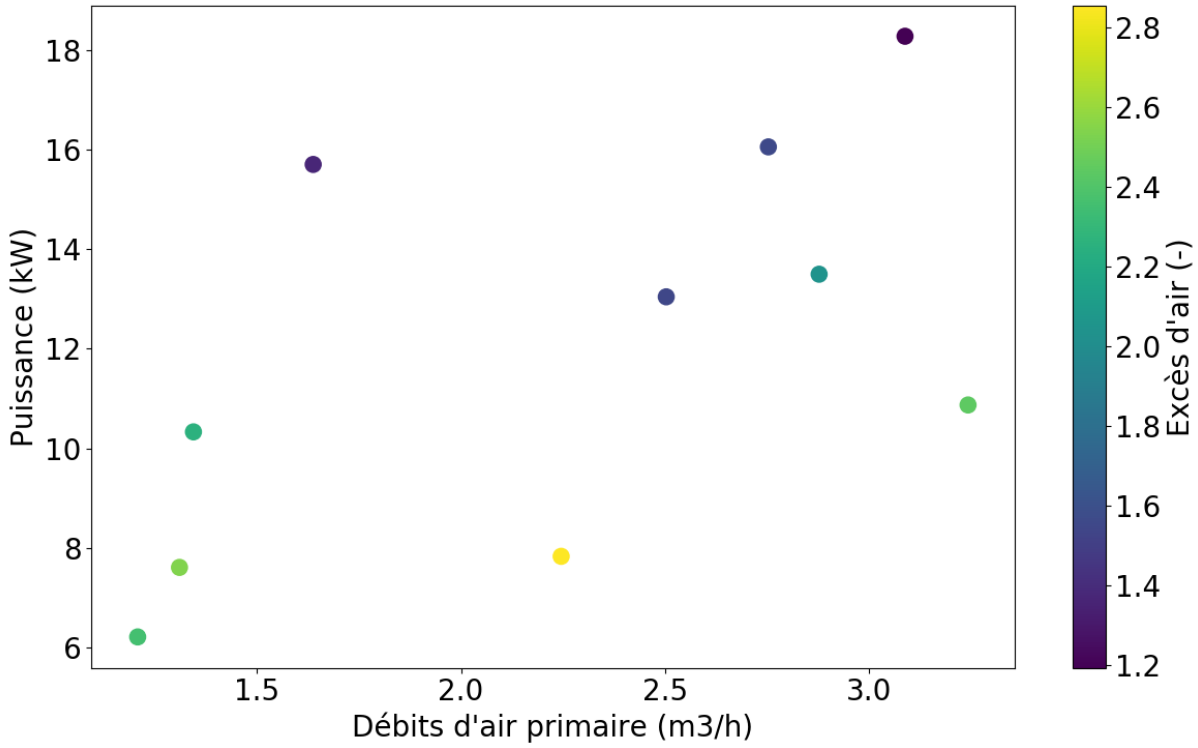


FIGURE 4.9 – Puissances combustible en fonction du débit d'air primaire et de lambda

Chapitre 5

Conclusions et perspectives

En conclusion, les résultats de *l'étude de la combustion des boues de karité* indiquent que la solution du prototype de brûleur est fonctionnelle. Il parvient à atteindre des températures élevées tout en maintenant de faibles taux de monoxyde de carbone (CO). Cependant, un problème d'étanchéité dans le réservoir conduit à la combustion d'une quantité importante de boues et des pics de monoxyde de carbone.

L'étude des caractéristiques des boues de karité a joué un rôle crucial dans la conception du prototype et donne une meilleure interprétation des résultats obtenus. Leur faible taux d'humidité (4 à 9 %) et leur petit calibre font des boues de barattages un combustible très énergétique, mais leur teneur en huile augmente les risques sur la santé en cas de combustion incomplète.

Toutefois, les nombreuses variables qui influencent la combustion de la biomasse rendent complexe la prise en compte de la synergie entre tous ces facteurs expérimentalement. Plusieurs de ces facteurs ont été identifiés comme ayant un impact significatif sur le fonctionnement du brûleur. L'isolation du foyer et la distribution de l'air primaire et secondaire à 20% ont été des paramètres qui ont montré des résultats prometteurs sur les performances de la combustion.

Pour améliorer le fonctionnement du brûleur, plusieurs pistes peuvent être envisagées. Tout d'abord, il est essentiel de repenser l'écoulement de la biomasse, en ajoutant un réservoir plus grand pour créer un effet de "couvercle" avec la biomasse et en diminuant significativement l'ouverture du réservoir. Une perte de charge, telle qu'un goulot, peut également être ajoutée pour dissuader l'entrée d'air par le réservoir.

L'alimentation des boues en continu par le haut du lit de combustion peut affecter la stabilité de la combustion en éteignant la flamme à chaque introduction au démarrage et pendant certaines phases plus froides. Une solution consiste à mettre en place un système de roue dentée de chaque côté du lit pour évacuer les cendres et alimenter en boues de manière continue.

D'autres améliorations peuvent être apportées pour optimiser la combustion, telles qu'une vitre de plus grande taille pour permettre de voir la flamme sur toute sa hauteur et des hauteurs d'air secondaire plus importantes pour soutenir une flamme plus élevée. Le diamètre des injections et la répartition de l'air secondaire sont des facteurs qui peuvent

également être ajustés, en gardant à l'esprit que les valeurs actuelles semblent fonctionner efficacement.

En revanche, certains paramètres tels que l'inclinaison de la grille et les hauteurs d'injection d'air secondaire n'ont pas été testés clairement quant à leur impact sur le fonctionnement du brûleur. Ces paramètres pourraient nécessiter une analyse plus poussée et des ajustements expérimentaux supplémentaires pour déterminer leur véritable influence.

En somme, bien que le prototype de brûleur de boues de karité présente des résultats prometteurs en termes de températures élevées et de faibles taux de CO, des améliorations sont nécessaires pour résoudre le problème d'étanchéité du réservoir et optimiser l'écoulement de la biomasse. Ces pistes d'amélioration permettront d'optimiser le fonctionnement du brûleur et d'exploiter pleinement son potentiel pour une combustion efficace et durable des boues de karité.

Bibliographie

[1] Biostar. *Plaquette Biostar*. Avr. 2021. URL : https://www.biostar-afrique.org/content/download/4907/38065/version/1/file/Plaquette+Biostar+avril+2021.pdf.

[2] Biostar Blin J. *Le projet / Les impacts visés*. 2021. URL : https://www.biostar-afrique.org/le-projet/les-impacts-vises.

[3] Blin J. et Biostar. *Caractérisation des résidus / La filière Karité : Boues de barattage*. Avr. 2021. URL : https://www.biostar-afrique.org/les-filieres/caracterisation-des-residus/la-filiere-karite/boues-de-barattage.

[4] Business Challenge. *Fours à balle de riz : une solution économique et écologique*. Nov. 2017. URL : http://businesschallengeniger.com/fours-a-balle-de-riz-solution-economique-ecologique/.

[5] DeepL Traduction. *DeepL Translate : le meilleur traducteur au monde*. URL : https://www.deepl.com/translator.

[6] Energypedia. *Gasifier Stoves*. 2028. URL : https://energypedia.info/wiki/Gasifier_Stoves#Gasifier_Stoves_for_Chunky_Fuels.

[7] Frank Fiedler. *The state of the art of small-scale pellet-based heating systems and relevant regulations in Sweden, Austria and Germany*. 2004. DOI : 10.1016/j.rser.2003.11.002.

[8] Frank Helbig et Christa Roth. « Solid biomass fuels for cooking-beyond firewood and charcoal ». In : *GIZ* (août 2017).

[9] Fulloy Léa. *Rapport de diagnostic des entreprises agroalimentaires. Entreprise : ABASF, Burkina Faso. Produit : Beurre de Karité*. Rapp. tech. 2022.

[10] Fulloy Léa. *Rapport de diagnostic des entreprises agroalimentaires. Entreprise : USCBN, Burkina Faso. Produit : Beurre de Karité*. Rapp. tech. 2022.

[11] Fulloy Léa et Ouedraogo Wennd Kouni Igor. *Rapport de diagnostic des entreprises agroalimentaires. Entreprise : ASY, Burkina Faso. Produit : Beurre de Karité*. Rapp. tech. Mai 2022.

[12] Fulloy Léa, Sandou Alexandre et Sawadogo Adama. *Rapport de diagnostic des entreprises agroalimentaires. Entreprise : RPBHC, Burkina Faso. Produit : Beurre de Karité*. Rapp. tech. Avr. 2022.

[13] Guillaume Gauthier et al. « Pyrolysis of centimetre-scale wood particles : New experimental developments and results ». In : ().

[14] Geo.fr. « PPM : à quoi correspond cette unité de mesure de la pollution ? » In : (). URL : https://www.geo.fr/environnement/ppm-a-quoi-correspond-cette-unite-de-mesure-de-la-pollution-193340#:~:text=L%27acronyme%20%C2%AB%20ppm%20%C2%BB%20signifie,plus%20globalement%20dans%20l%27environnement.

[15] Göran Berndes et al. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Sous la dir. de Sjaak van Loo et Jaap Koppejan. Earthscan publishes in association with the International Institute for Environment et Development, 2008. ISBN : 1-84407-249-5.

[16] Govaerts Bernadette et Leboulengé Eric. « Cycle et stratégies expérimentales ». In : *UCL-Cours STAT 2520*. Fév. 2005. Chap. 1, p. 1-1.

[17] Health Effects Institute. « The State of Air Quality and Health Impacts in Africa. » In : *A Report from the State of Global Air Initiative* (2022). URL : https://www.healthdata.org/policy-report/state-air-quality-and-health-impacts-africa.

[18] Hervé Jeanmart. « Biomass Caracterization ». In : *LMECA2325 Biomass Conversion*. 2021.

[19] Hervé Jeanmart. « Biomass Combustion ». In : *LMECA2325 Biomass Conversion*. 2021.

[20] Kati Veijonen et al. *Biomass co-firing - An efficient way to reduce greenhouse gas emissions*. Rapp. tech. European Bioenergy Networks (EUBIONET), VTT Processes, mars 2003.

[21] KVDP et Irene Delgado. *Three stone cooking fire*. Jan. 2023. URL : https://www.appropedia.org/Three_stone_cooking_fire.

[22] *Lavoisier chemicals store | UCLouvain*. URL : https://uclouvain.be/en/research-institutes/imcn/most/lavoisier-chemicals-store.html.

[23] Louppe D. « Foyers améliorés ». In : ().

[24] J Porteiro et al. « Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor ». In : *Fuel* 89 (2009), p. 26-35. DOI : 10.1016/j.fuel.2009.01.024.

[25] *Quand partir au Burkina Faso ? Climat, Températures et Météo*. URL : https://www.partir.com/Burkina-faso/quand-partir.html.

[26] *Quand partir en Belgique ? Climat, Météo et Affluence*. URL : https://www.partir.com/Belgique/quand-partir.html.

[27] Ravaloson Misitia. *Pouvoir calorifique : définition, calcul & différence entre PCI et PCS*. URL : https://selectra.info/energie/guides/comprendre/pouvoir-calorifique.

[28] Araceli Regueiro et al. « Effect of air staging ratios on the burning rate and emissions in an underfeed fixed-bed biomass combustor ». In : *Energies* 9.11 (nov. 2016). ISSN : 19961073. DOI : 10.3390/en9110940.

[29] Rivrenna Pierfranco. *Manuel Pour La Construction Des Cuisinieres A Balle De Riz Pour Les Pays En Voie De Developpement*. 2015. URL : https://www.calameo.com/books/004354283923e604aeb8e#.

[30] Roth Christa. *Micro-gasification : Cooking with gas from biomass. An introduction to the concept and the applications of wood-gas burning technologies for cooking.* 1re éd. GIZ HERA, jan. 2011.

[31] Solstice. *Conversion ppm > mg/m.* URL : http://www.solstice-analyse.com/trucs-et-astuces/conversion-ppm-mgm/.

[32] Vyncke. *BIOMASS SOLUTION RANGE | VYNCKE – Boiler Range : 1-100 MW & 1-15 MWe.* URL : https://www.vyncke.com/our-solutions/our-solution-range/.

[33] Walker Andy. *Natural Ventilation | WBDG - Whole Building Design Guide.* Fév. 2016. URL : https://www.wbdg.org/resources/natural-ventilation.

[34] Wikipédia. *Domestication du feu.* URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Domestication_du_feu.

[35] Wikipédia. *Tirage thermique.* URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Tirage_thermique.

Annexe A

Détails de l'analyse des boues de karité

A.1 Caractérisation des boues de karité faites par le Cirad

TABLE A.1 – Callibration des boues de karité faite par le Cirad [3]

Granulométrie (NF EN ISO 17827)	d50 (mm) = >20	
Classe de tamis	Fraction (%)	Part cumulée (%)
0 à 0,2 mm	0,3	0,3
>0,2 à 0,5 mm	2,3	2,6
>0,5 à 1 mm	3,0	5,6
>1 à 1,6mm	2,1	7,7
>1,6 à 4mm	5,3	13,0
>4 à 5 mm	2,1	15,1
>5 à 10 mm	10,5	25,6
>10 à 12,5mm	4,3	29,9
>12,5 à 16 mm	7,9	37,8
>16 à 20 mm	9,6	47,4
> 20 mm	52,6	100,0
Total		

A.2 Caractérisation des boues de karité faites au laboratoire

TABLE A.2 – Caractérisation des boues de karité disponible au laboratoire Credem (novembre 2021

Grandeur	**Notation**	**Valeur**	**Unité**	**source**
Analyse sommaire				
Pouvoir calorifique inférieur anhydre	PCI_d	24652	J/g_d	Cirad
Taux d'humidité brut	$(M')_{ar}$	9,49	$\%_{ar}$	labo
Pouvoir calorifique inférieur brut	PCI_{ar}	22299	J/g_{ar}	cacul (2.7)
Analyse élémentaire				
Taux de carbone	(C)	59	$\%_{daf}$	SOURCE ?
Taux d'hydrogène	(H)	6,9	$\%_{daf}$	SOURCE ?
Taux d'oxygène	(O)	30,6	$\%_{daf}$	calcul (2.3)
Taux d'azote	(N)	3,5	$\%_{daf}$	SOURCE ?
Formule chimique des boues		$CH_{1,38}O_{0,40}N_{0,051}$	-	calcul (2.4)
Masse molaire des boues	M_{boues}	$20,34$	g/mol	calcul (2.5)
Granulométrie				
>10mm	x_{10}	12,98	$\%_m$	labo
<10mm et >5mm	x_5	18,75	$\%_m$	labo
<5mm et >2mm	x_2	28,09	$\%_m$	labo
<2mm et >600µm	$x_{0,6}$	26,09	$\%_m$	labo
<600µm	x_0	14,09	$\%_m$	labo
Densité apparente				
tout	ρ_{boues}	398,2	kg/m^3	labo
>5mm	ρ_5	338,85	kg/m^3	labo
>2mm	ρ_2	370,5	kg/m^3	labo
Angle de talus	α_{talus}	20	°	labo

TABLE A.3 – Table des mesure d'humidité faire au laboratoire

échantillon n°	$\boldsymbol{m_{boues,ar}}$ **en t=0h** g_{ar}	$\boldsymbol{m_{boues,d}}$ **en t=24h** g_d	$\boldsymbol{m_{H_2O}}$ g_{H_2O}	**(M')** $\%_{ar}$	**(M)** $\%_d$
1	116,77	105,64	11,13	9,53	10,54
2	104,94	94,72	10,22	9,74	10,79
3	29,34	26,64	2,7	9,2	10,14
moyenne				9,49	10,49

FIGURE A.1 – Analyse élémentaire des boues de karité faite par le Cirad [3]

Date du prélèvement	12/04/2021	
Information sur le prélèvement	Unité artisanale de production de beurre de karité à Ouagadougou, Burkina Faso	

Analyse (unité)	Méthode	Résultat
Humidité (brute %)	NF EN ISO 18134-3	3,7
Masse volumique (brute Kg/m3)	NF EN ISO 17828	273
Masse volumique (anhydre Kg/m3)		263
Cendres (anhydre %)	NF EN ISO 18122	4,1
Matières volatiles (anhydre %)	NF EN ISO 18123	75,0
PCS (brut J/g)	NF EN ISO 18125	24946
PCS (anhydre J/g)		25807
PCI (anhydre J/g)		24652
PCI (brut J/g)		23748
Extractibles à l'éthanol (% anhydre)	Extraction au soxhlet	26,9
Extractibles à l'hexane (% anhydre)		29,1
Hémicellulose (% anhydre)	NF EN ISO 16472 et NF EN ISO 13906	13,1
Cellulose (% anhydre)		7,3
Lignine (% anhydre)		25,8
N (anhydre %)	NF EN ISO 16948	2,31
C (anhydre %)		58,2
H (anhydre %)		6,66
O (calcul) (anhydre %)		28,3
S (% anhydre)	Minéralisation µ-onde + acide - analyse ICP-AES	0.211
Cl (% anhydre)	Extraction HNO3 - colorimétrie	0.04
SiO2 (% anhydre)	Gravimétrie pendant minéralisation	1,5
P (% anhydre)	Minéralisation double calcination - analyse ICP-AES	0.112
K (% anhydre)		0.937
Ca (% anhydre)		0.159
Mg (% anhydre)		0.113
Na (% anhydre)		0.009
Cu (mg/kg anhydre)		3.20
Fe (mg/kg anhydre)		1211.3
Mn (mg/kg anhydre)		14.1
Zn (mg/kg anhydre)		20.5
B (mg/kg anhydre)		9.63
Al (mg/kg anhydre)		1346.1
Ti (mg/kg anhydre)		91.54

Annexe B

Détails sur le design du prototype

B.1 Tableaux récapitulatifs des dimensions du brûleur prototype

B.2 Référence des outils de mesure utilisés

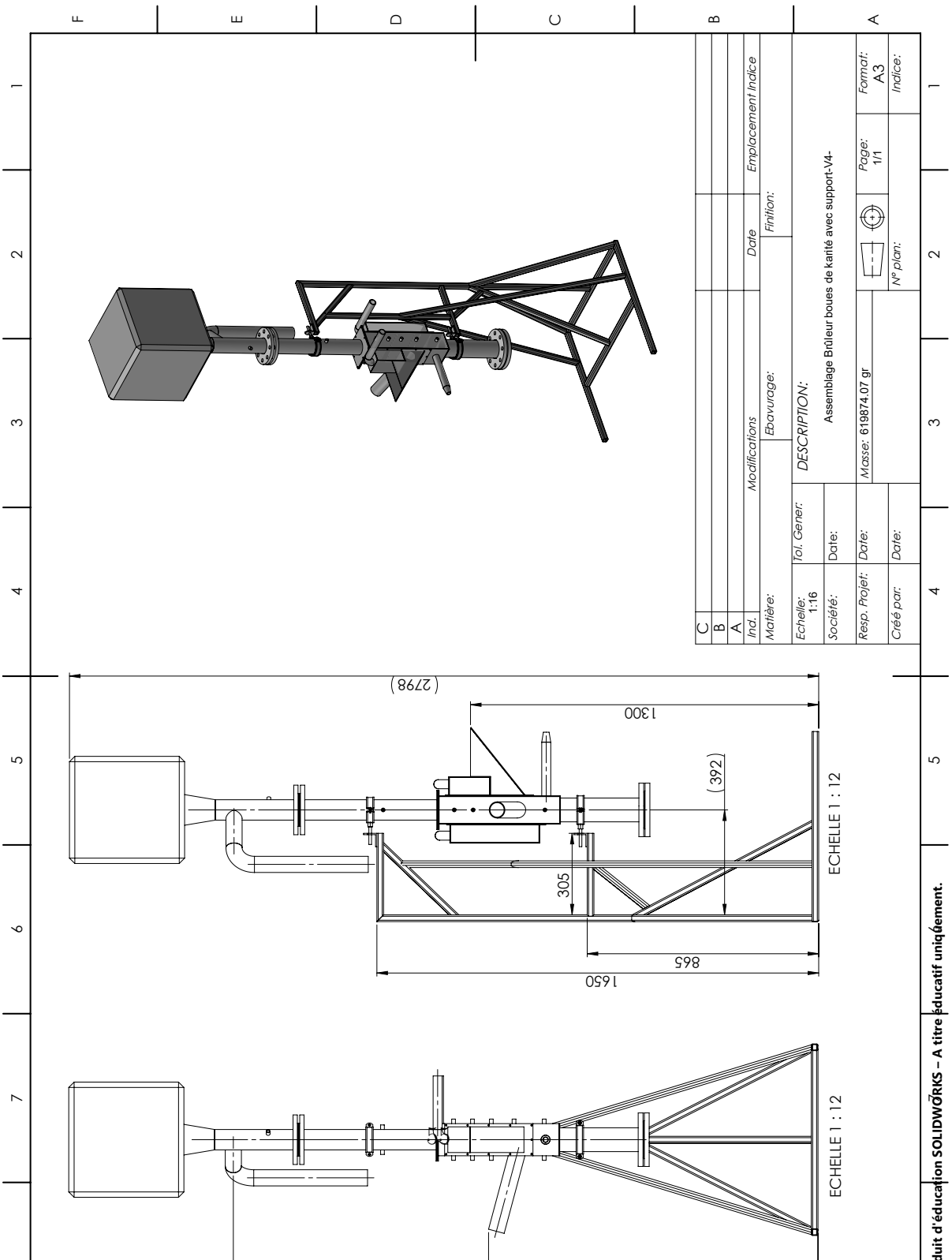
B.3 Photos du prototype

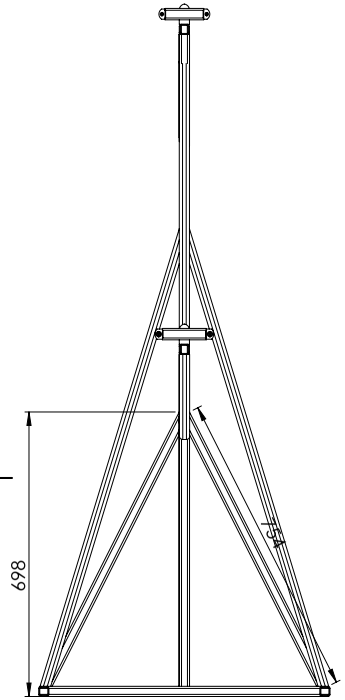
TABLE B.1 – Répertoire des outil utilisé sur le prototype expérimental

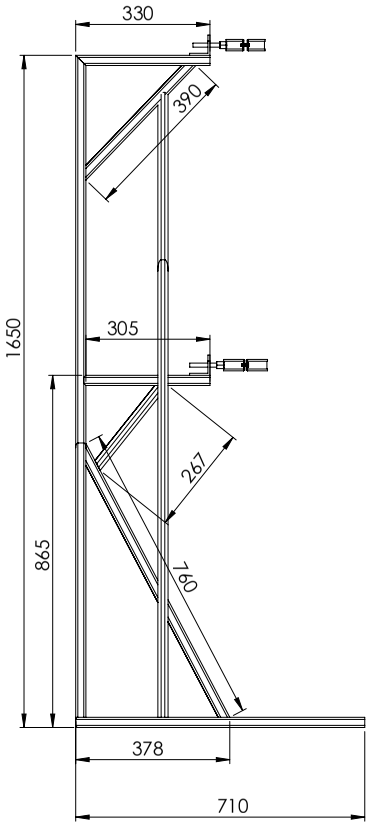
Type d'appareil	Référence PID	Intervalle des mesure	Unité	Modèle (Fabriquant)
Thermocouple	T101A	[0-1100]	°C	type K Inconel 1.5X200mm sur cable (TC S.A.)
	T102A	[0-1100]	°C	type K Inconel 3.0X100mm sur cable (TC S.A.)
	T103A	[0-1100]	°C	type K Inconel 3.0X200mm sur cable (TC S.A.)
Transmetteur de pression différencielle	P203A	[0-250] ; [0-500] ; [0-1250]	Pa	MS-111-LCD (ELNEO)
	P202A	[0-25] ; [0-50] ; [0-100]	Pa	MS-121-LCD (ELNEO)
	P203A	[0-250] ; [0-500] ; [0-1250]	Pa	MS-111-LCD (ELNEO)
Débitmètre	V301A	[0-20]	Nm^3/h	[0695 0521 + Z695 0520] Inline flow meter VA520 - 1/2" BSPM - Low speed version (ELNEO)
	V302A	[0-75]	Nm^3/h	[0695 0523 + Z695 0520] Inline flow meter VA520 - 1" BSPM - Low speed version (ELNEO)
	V303A	[0-75]	Nm^3/h	[0695 0523 + Z695 0520] Inline flow meter VA520 - 1" BSPM - Low speed version (ELNEO)
Analyseur de combustion	-	[0-10 000]	ppm CO	Testo 350 Analyse box Control Unit (TESTO)

Annexe C

Plans SolidWorks du prototype







No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	Support Brûleur karité	Support Brûleur	1
2	84-93 m10.step	Pièce	1
3	Cornière 25 x 25 x 3	Pièce	2
4	Tige filetage M10	Pièce	2
5	75-84 m10.step	Pièce	1

Soudure à toutes les jonctions

C			
B			
A			
Ind.	Modifications	Date	Emplacement Indice
Matière:	Ebavurage:	Finition:	
Echelle: 1:10	Tol. Gener:	DESCRIPTION: Assemblage support Brûleur boues de karité -V4-	
Société:	Date:		
Resp. Projet:	Date:	Masse: 21232.32 gr	Page: 1/1 — Format: A3
Créé par:	Date:	N° plan:	Indice:

Produit d'éducation SOLIDWORKS – A titre éducatif uniquement.

Annexe D

Analyse de risque

Analyse de Risque faite par le Credem et Lara Lejeune en février 2023

Annexe E

Détails sur les essais sur le prototype

E.1 Plan initial des essais en laboratoire

E.2 Moyennes calculées sur base des résultats du laboratoire

E.2.1 Essais préliminaires

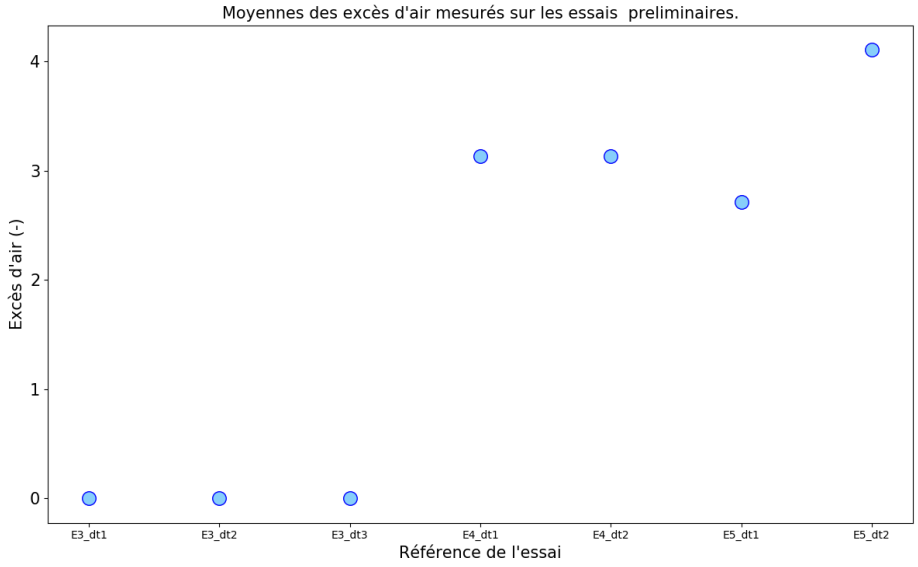


FIGURE E.1 – Moyennes de l'excès d'air

E.2.2 Essais pour le test des paramètres de design

E.3 Résultats obtenus en laboratoire

E.3.1 Essai 3 , 17 février

E.3.2 Essai 4 , 23 février

E.3.3 Essai 5 , 03 mars

E.3.4 Essai 6 , 16 mars

E.3.5 Essai 7 , 29 mars

E.3.6 Essai 8, 07 avril

E.3.7 Essai 9, 21 avril

E.3.8 Essai 10, 19 mai

	facteurs	isolant	D grille	h_ouv	cadence boues	a grille	P_th	Q_AIR	r p/total	Q prim	Q_sec	r sec av/tot	Q sec_av	Q sec_ar
	unités		mm	mm		°	kW	m3/h	%	m3/h	m3/h	%	m3/h	m3/h
	valeurs	rien	3	40	continu =	15	10	20,00	10			0		
		foyer	5	60	réservoir	30	7,5	15,00	20			50		
		foy+chem		80	tjrs plein		5	10	30			100		
					discontinu =				40					
					couvercle				50					
					tjrs fermé									
essai														
1	a	-	5	40	-	15								
2	a	-	5	40	-	15								
3	3.1	-	5	40	continu	15	10	20,00	20	4,00	16,00	50	8,00	8,00
	3.2													
	3.3													
4	4.1	foy+chem	**3**	40	continu	15	10	20,00	20	4,00	16,00	50	8,00	8,00
	4.2													
5	start	foyer	3	60	remplissage									
	5.1	foyer	3	60	continu	15	10	20,00	20	4,00	16,00	50	8,00	8,00
	trans	foyer	3	60	remplissage									
	5.2	foyer	3	60	continu	15	10	20,00	10	2,00	18,00	50	9,00	9,00
6	start +trans	foyer	3	60	remplissage									
	6.1	foyer	**3**	**60**	**continu**	**15**	7,5	15,00	**20**	3,00	12,00	50	6,00	6,00
	6.2	foyer	3	60	continu	15	7,5	15,00	**10**	1,50	13,50	50	6,75	6,75
7	start	foyer	5	80	remplissage	30	7,5	15,00	20	3	12	50		
	7.1	foyer	**5**	**80**	**discontinu**	**30**								
	7.2	foyer	5	80	discontinu	30								
8	start	foyer	5	80	remplissage	30	7,5	15,00	20	3,00	12,00	50	6	6
	8.1	foyer	5	80	continu	30	7,5	**15,00**	20	3,00	12,00	50	6	6
	8.2	foyer	5	80	continu	30	5	**10,00**	20	2	8,00	50	4	4
9	start	foyer	5	80	remplisage	30	7,5	15,00	20	3,00	12,00	0	0	12
	9.1	foyer	5	80	continu	30	7,5	15,00	20	3,00	12,00	**0**	0	12
	9.2	foyer	5	80	continu	30	7,5	15,00	20	3,00	12,00	**100**	12	0
10	start	foyer	5	80	remplissage	30	7,5	15,00	30	4,50	10,50	50	5,25	5,25
	10.1	foyer	5	80	continu	30	5	**10,00**	30	3,00	7,00	50	3,50	3,50
	10.2	foyer	5	80	continu	30	2,5	**5,00**	30	1,50	3,50	50	1,75	1,75
	cacahuètes	foyer	5	80	continu	30								

TABLE E.1 – Matrice d'expériences du prototype

TABLE E.2 – Résumé des moyennes de tous les essais

	P_boues	T101A	T102A	T103A	P201A	P202A	P203A	F301A	F302A	F303A	CO	lambda
E3_dt1	0,00	71	239	334	126	3	7	4,12	7,60	7,70	0	0,00
E3_dt2	0,00	71	402	541	130	5	8	4,32	7,72	7,89	0	0,00
E3_dt3	0,00	48	287	299	126	5	102	4,69	7,99	8,51	0	0,00
E4_dt1	0,00	253	163	767	84	21	115	3,65	9,79	9,42	0	3,13
E4_dt2	0,00	142	208	705	68	11	80	3,22	6,72	8,02	0	3,13
E5_dt1	0,00	217	545	734	112	15	124	4,05	7,42	8,35	0	2,71
E5_dt2	0,00	104	409	548	125	7	129	2,24	8,93	9,58	0	4,11
E6_dt1	10,87	127	524	665	78	14	84	3,24	5,59	6,05	351	2,44
E6_dt2	10,33	167	411	679	63	25	86	1,34	5,80	7,15	384	2,26
E7_dt1	7,61	251	545	506	41	8	34	1,31	1,56	6,77	2206	2,54
E7_dt2	6,21	144	432	400	39	7	33	1,21	1,53	6,65	197	2,36
E8_dt1	13,05	186	688	784	48	12	68	2,50	6,09	6,83	1080	1,55
E8_dt2	7,83	159	558	605	41	8	55	2,25	4,48	4,91	1238	2,85
E9_dt1	16,06	207	674	871	51	17	81	2,75	0,05	9,23	3205	1,56
E9_dt2	13,50	142	594	691	53	15	80	2,88	10,66	0,04	2736	2,05
E10_dt1	18,28	199	727	913	58	19	90	3,09	3,58	3,57	12889	1,19
E10_dt2	15,71	184	714	806	31	17	59	1,64	1,82	1,83	3622	1,37

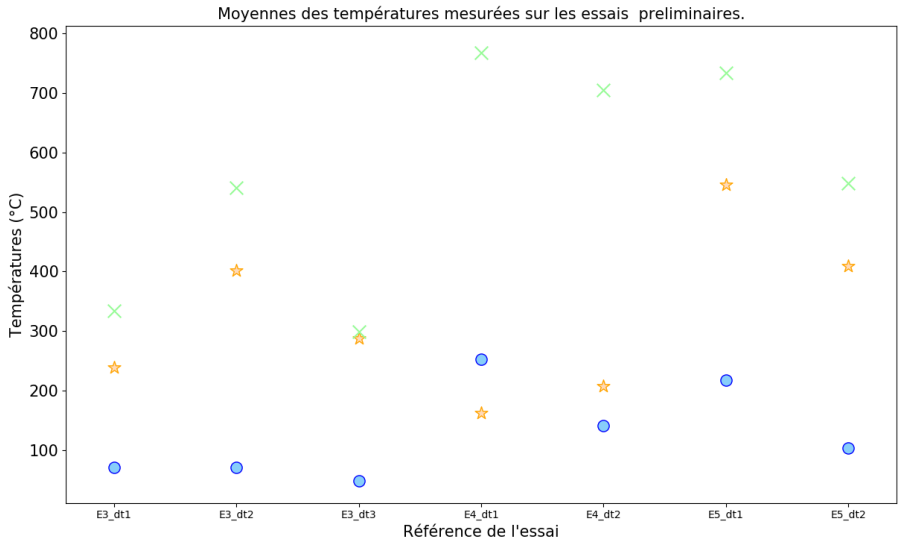


FIGURE E.2 – Moyennes des températures

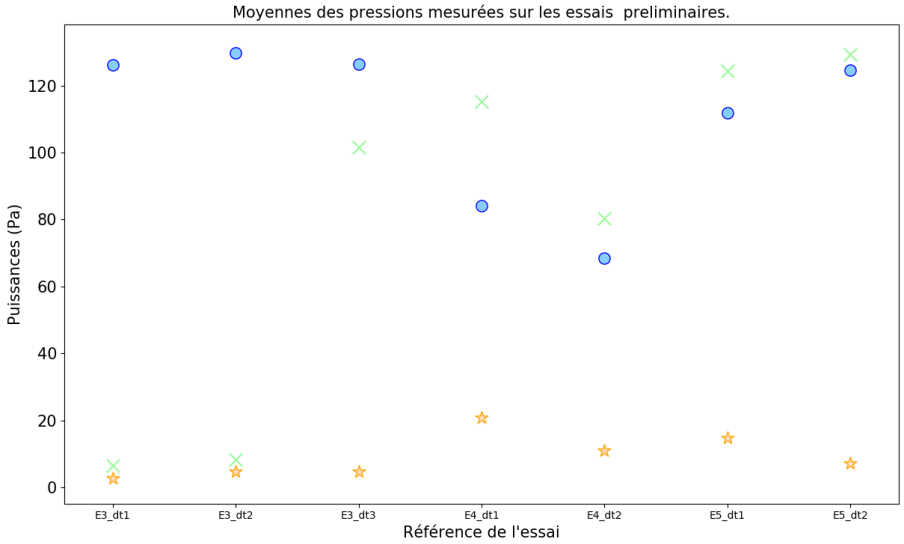


FIGURE E.3 – Moyennes des pressions

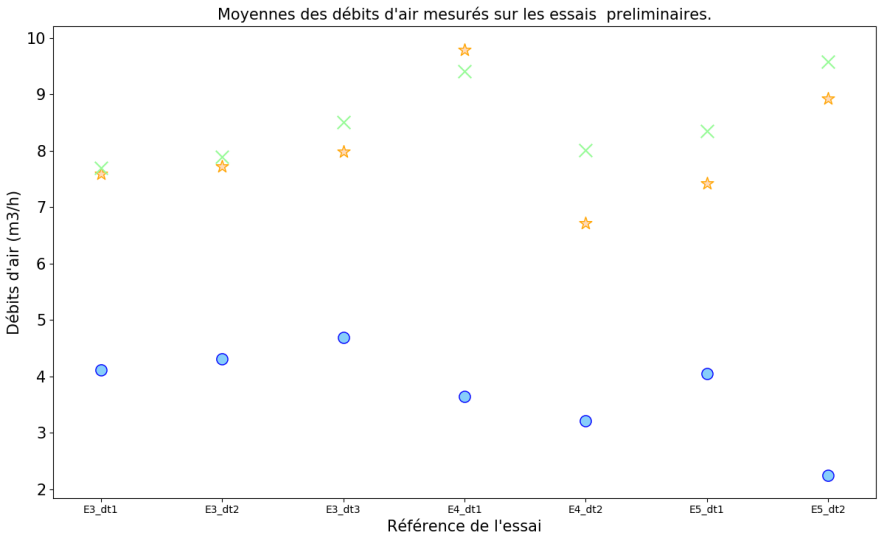


FIGURE E.4 – Moyennes des débits

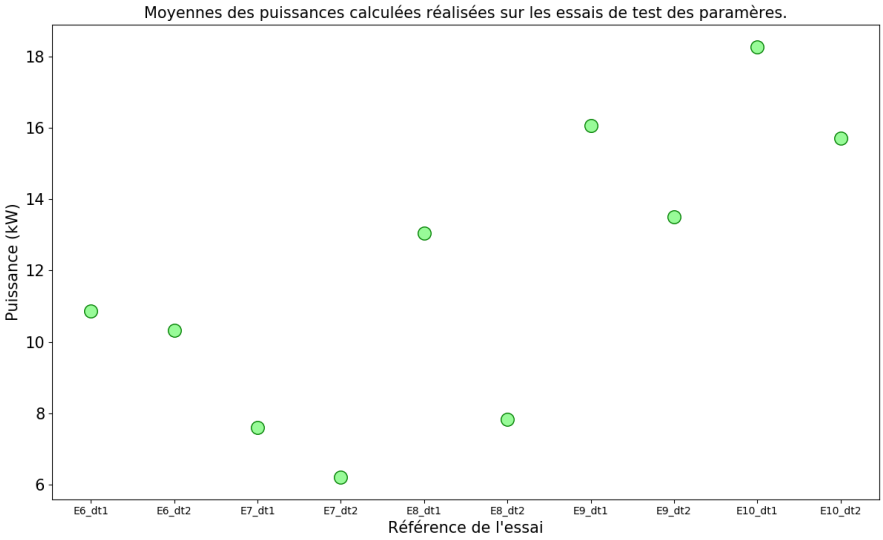


FIGURE E.5 – Moyennes des puissances

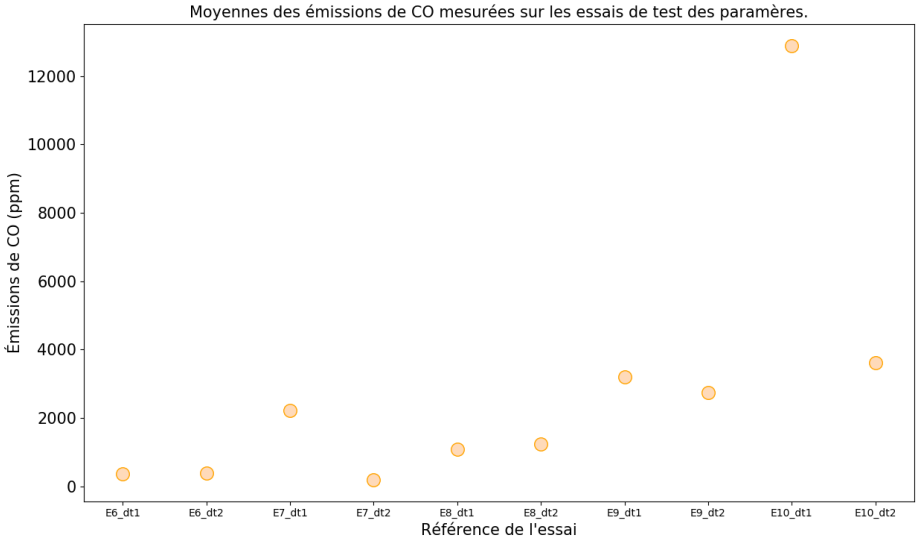


FIGURE E.6 – Moyennes des émissions de CO

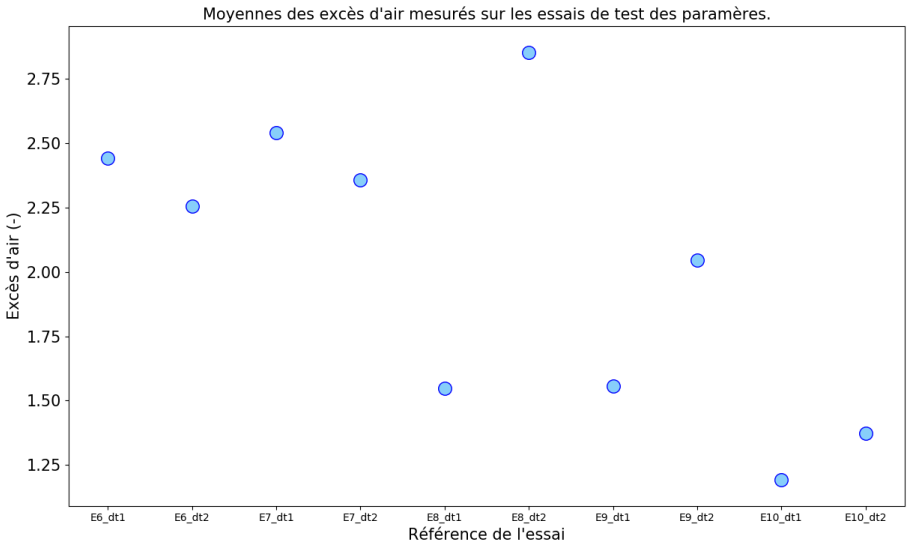


FIGURE E.7 – Moyennes de l'excès d'air

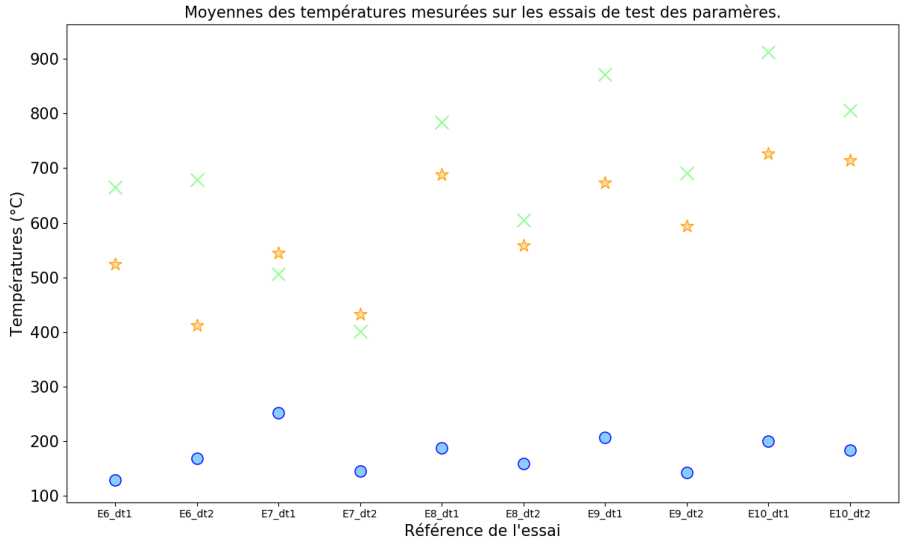


FIGURE E.8 – Moyennes des températures

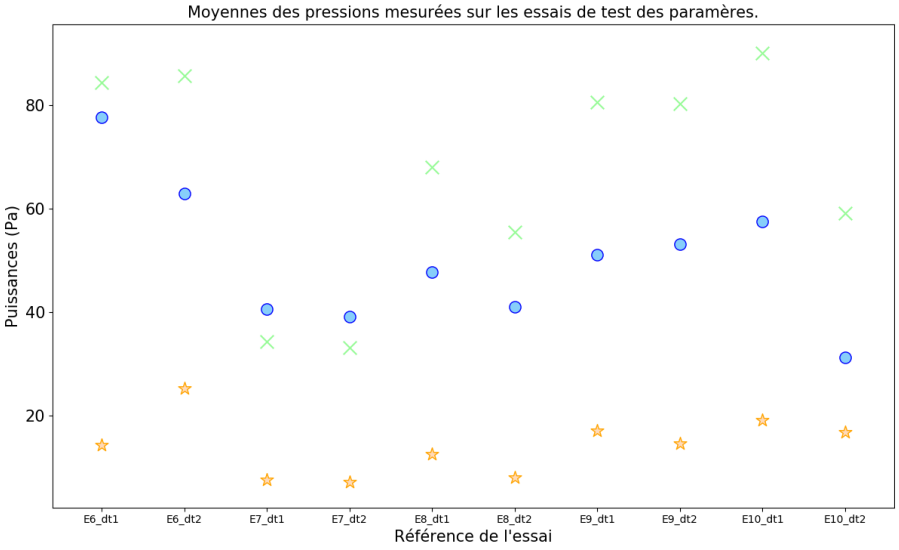


FIGURE E.9 – Moyennes des pressions

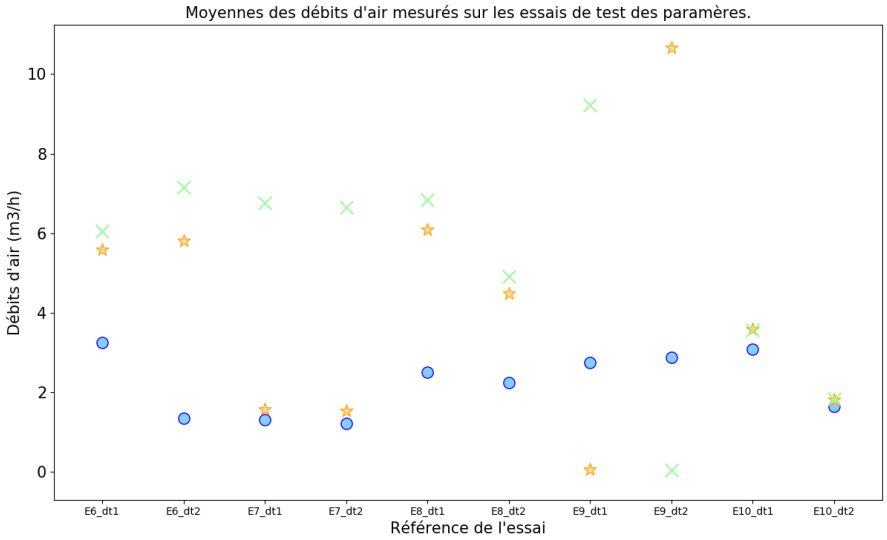


FIGURE E.10 – Moyennes des débits

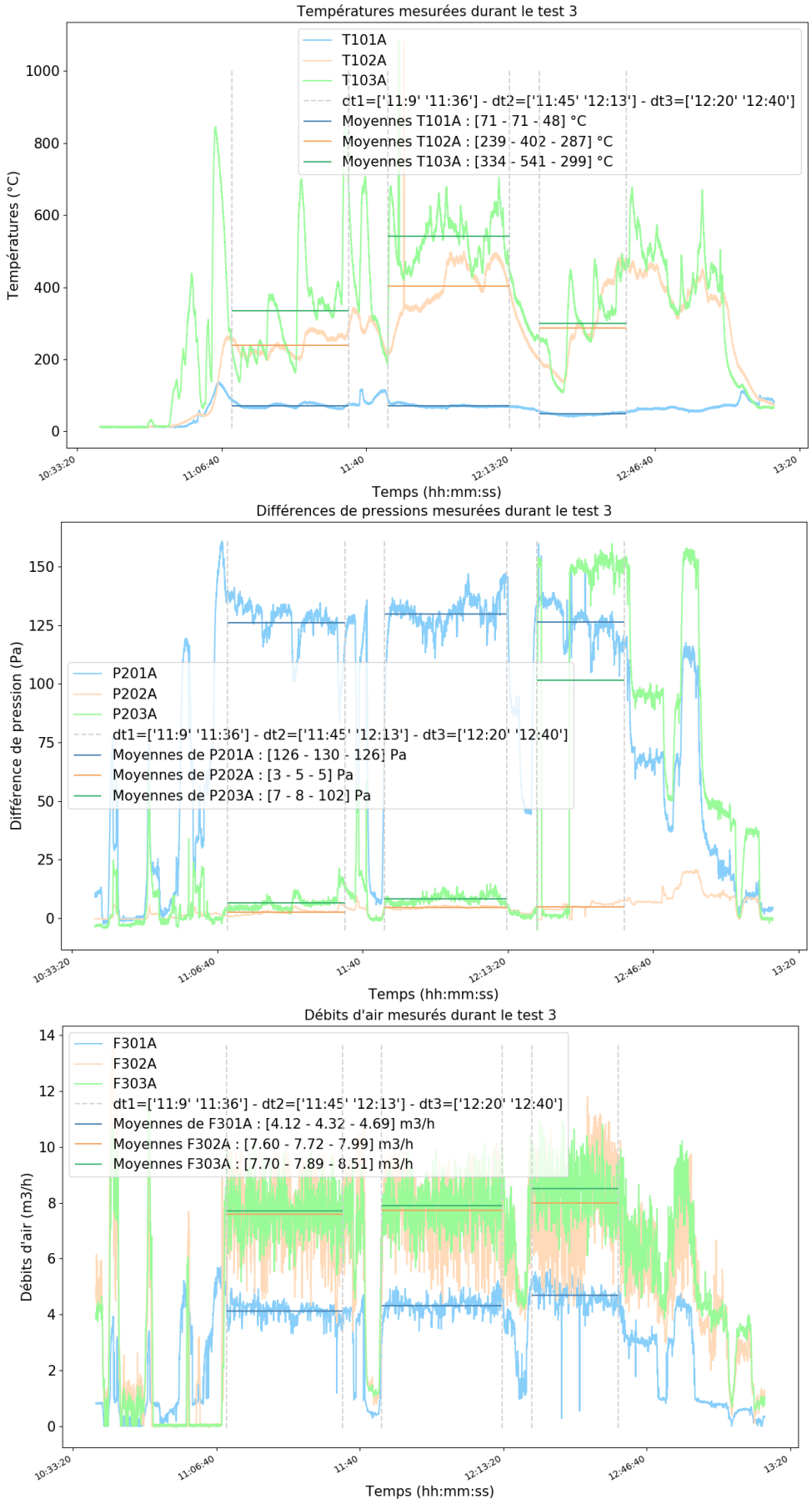


FIGURE E.11 – Données LabView de l'essai 3

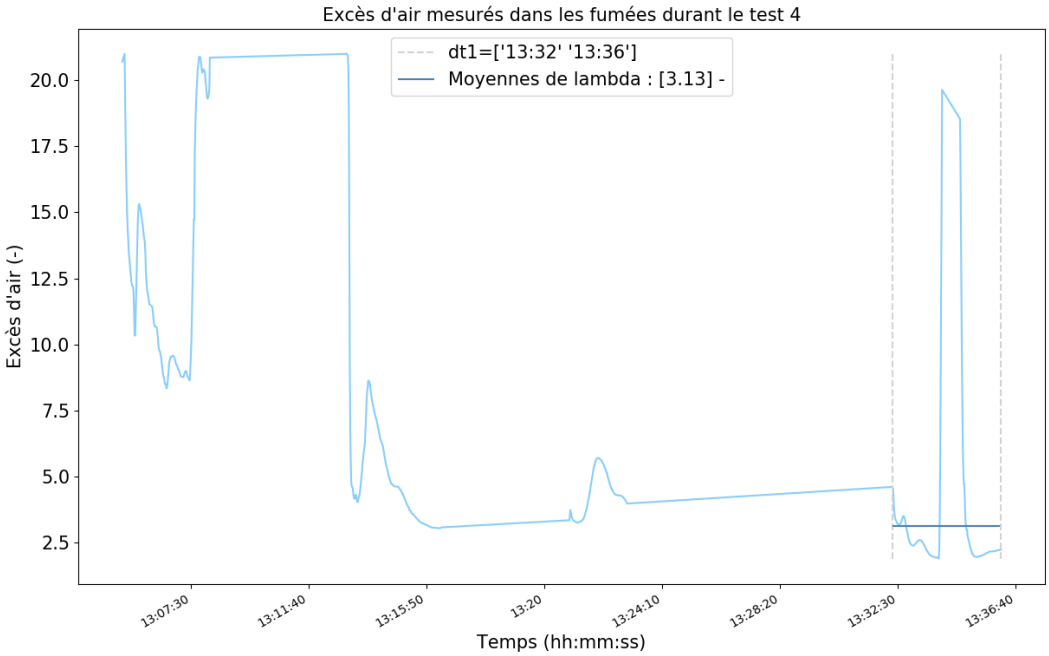


FIGURE E.12 – Données Testo de l'essai 4

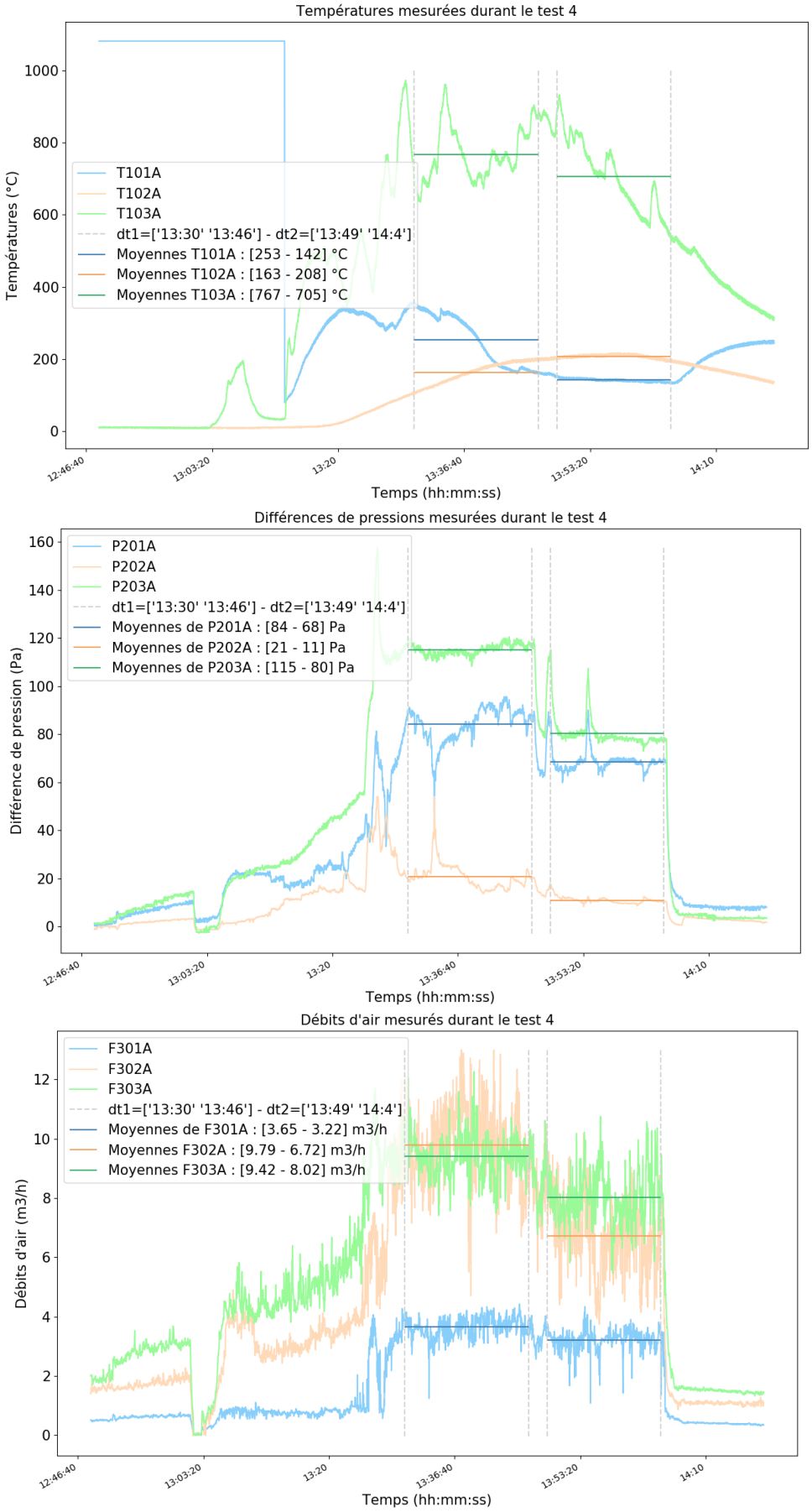


FIGURE E.13 – Données LabView de l'essai 4

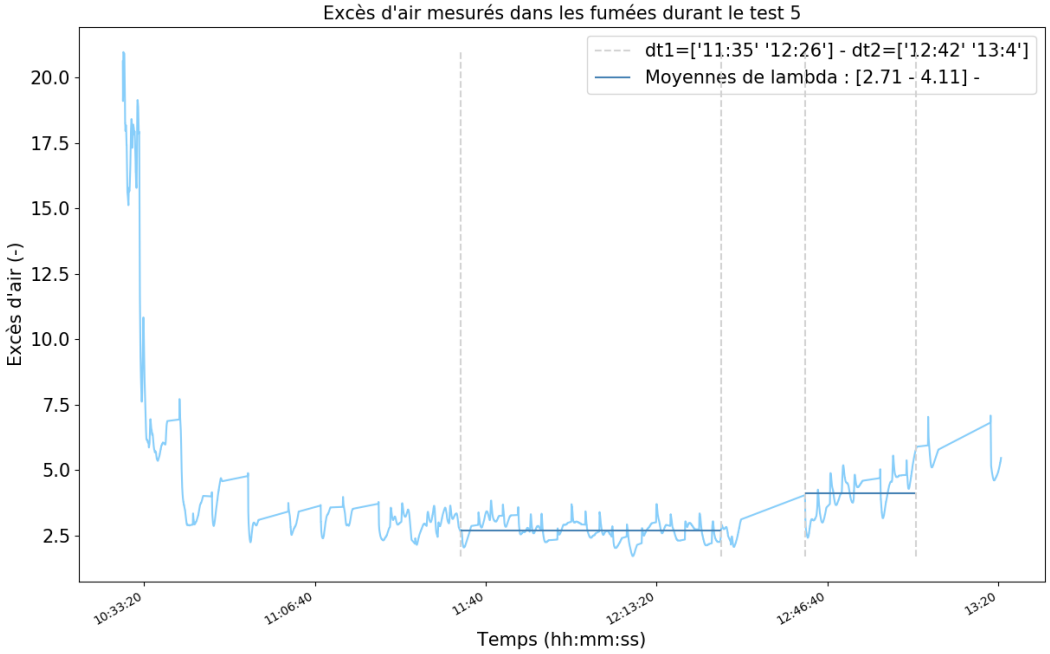


FIGURE E.14 – Données Testo de l'essai 5

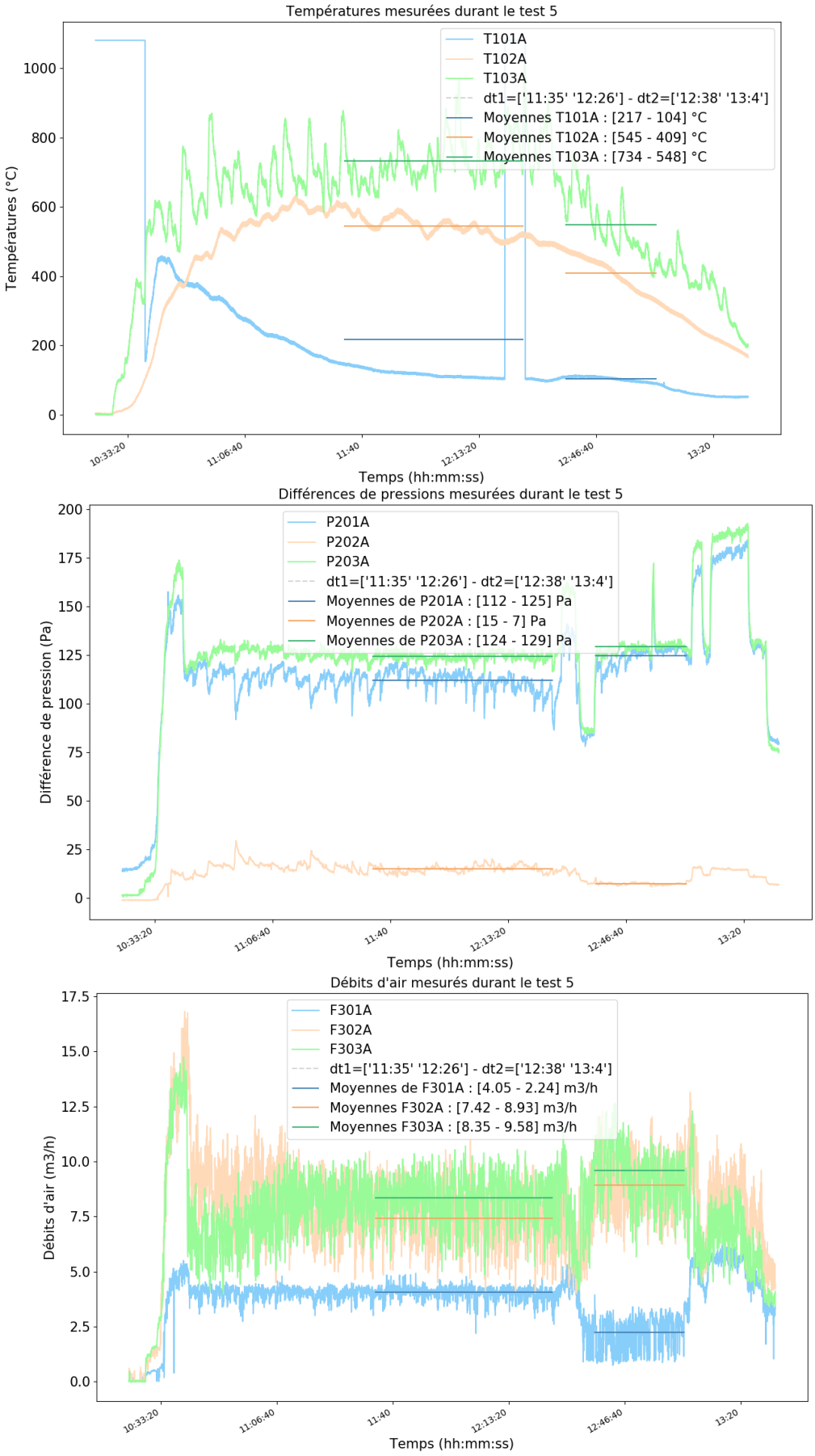


FIGURE E.15 – Données LabView de l'essai 5

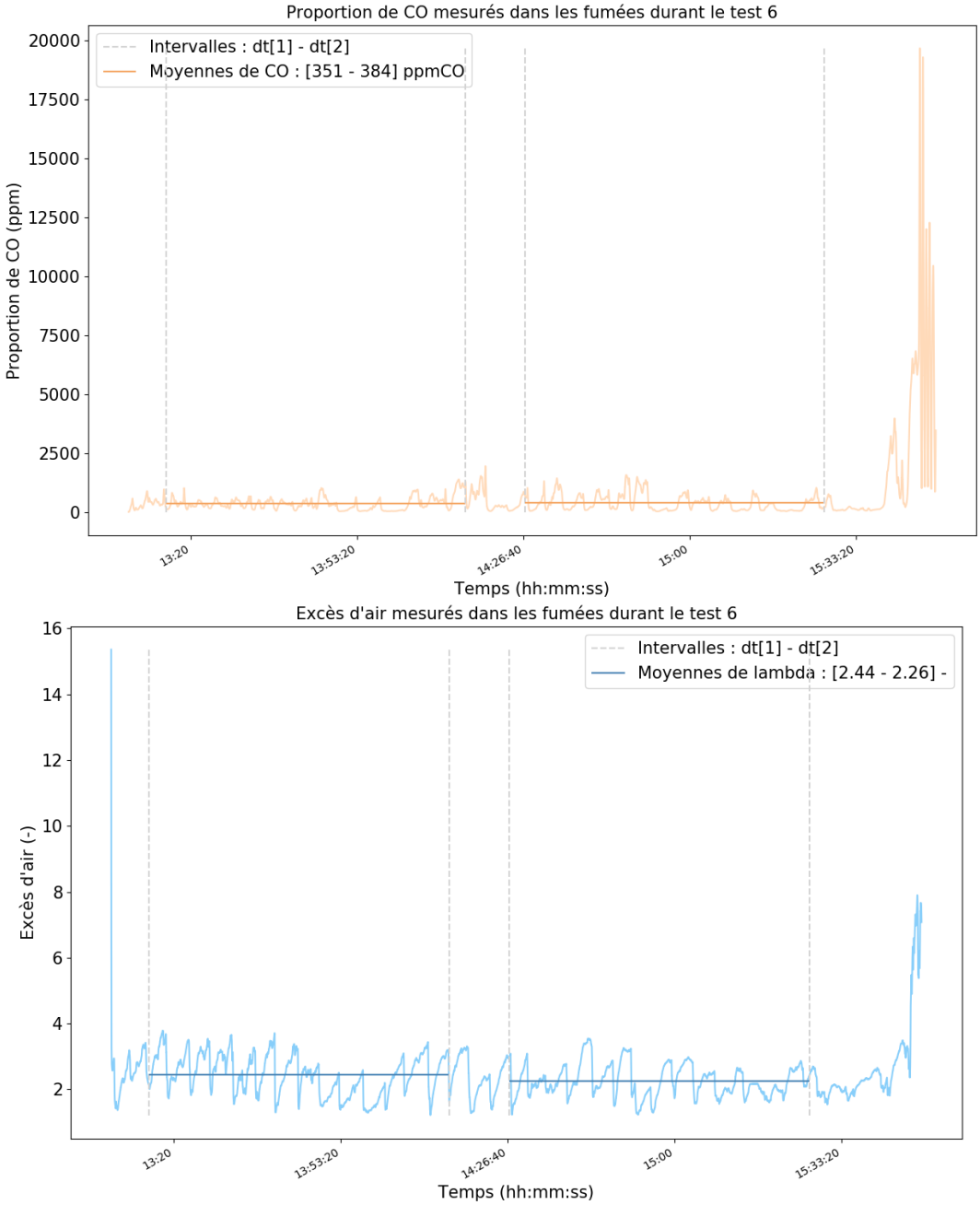


FIGURE E.16 – Données Testo de l'essai 6

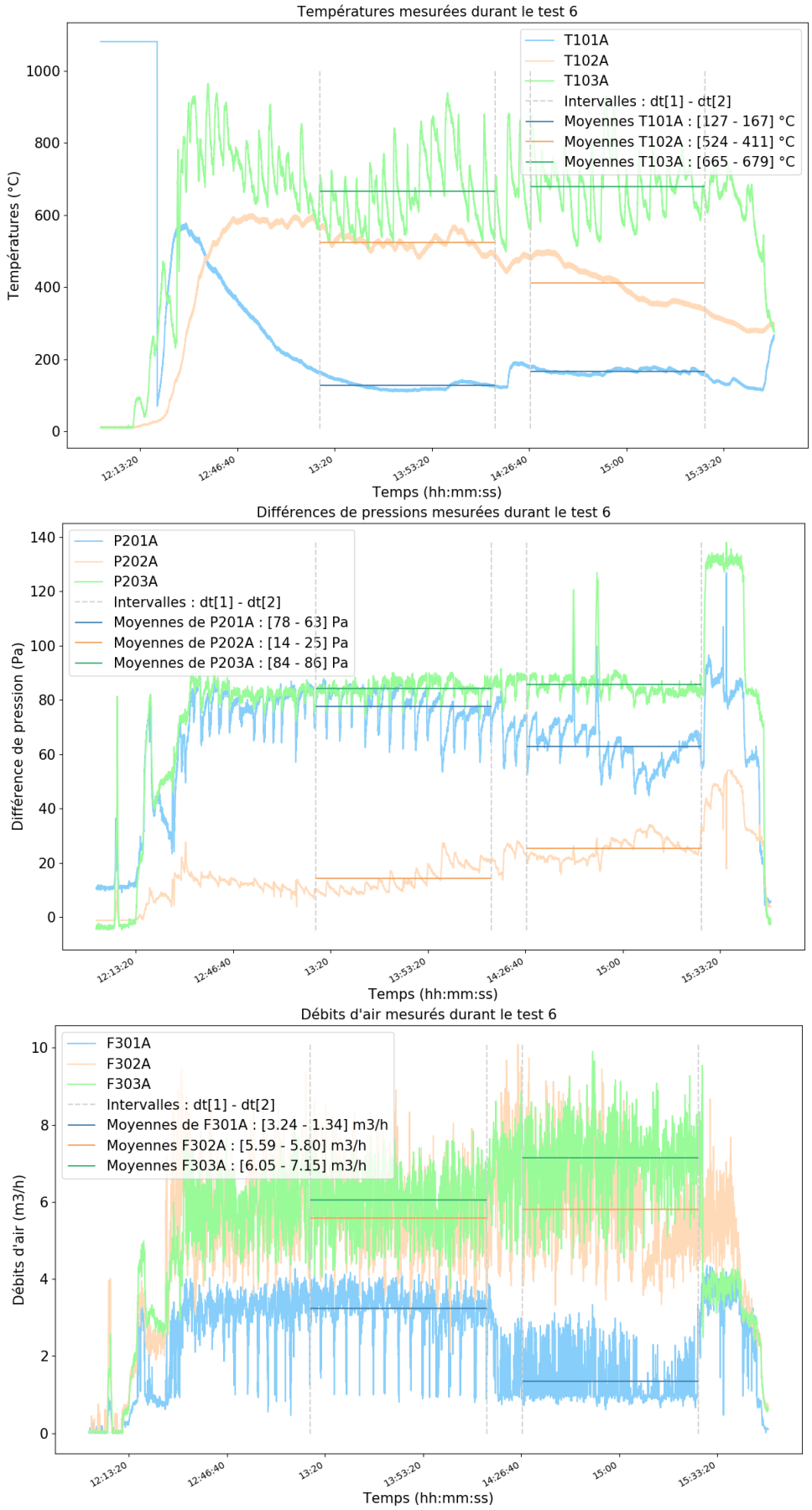


FIGURE E.17 – Données LabView de l'essai 6

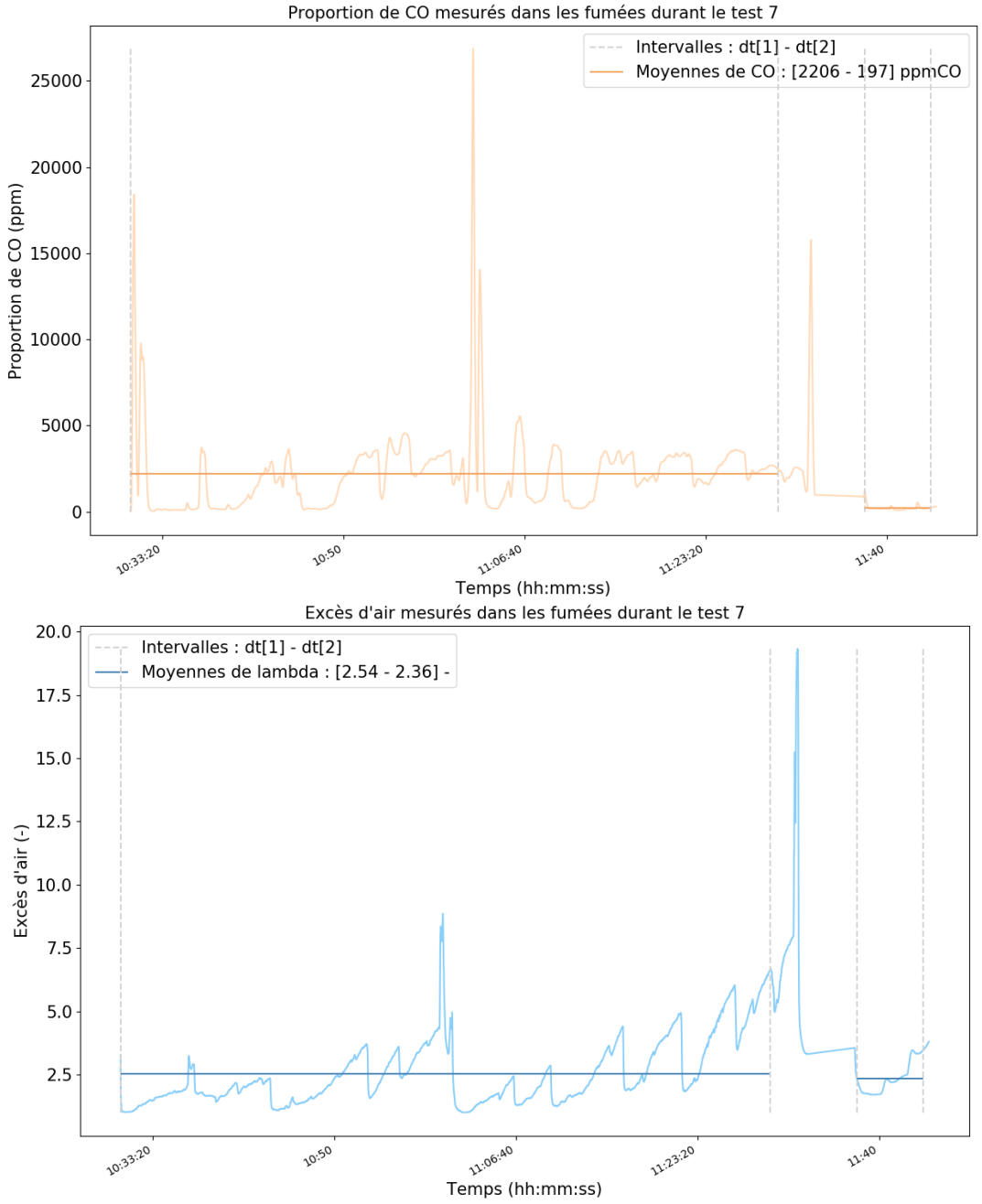


FIGURE E.18 – Données Testo de l'essai 7

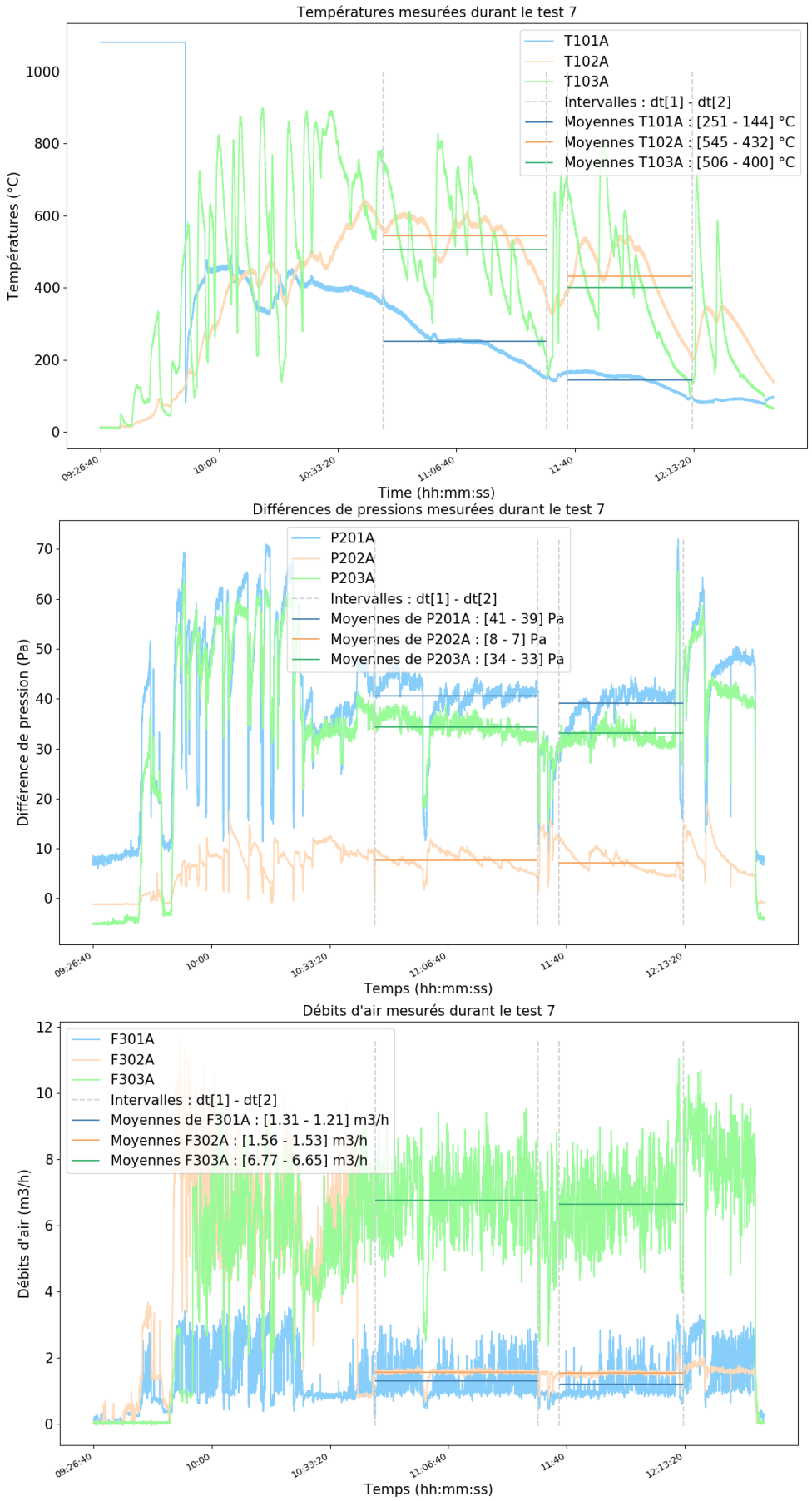


FIGURE E.19 – Données LabView de l'essai 7

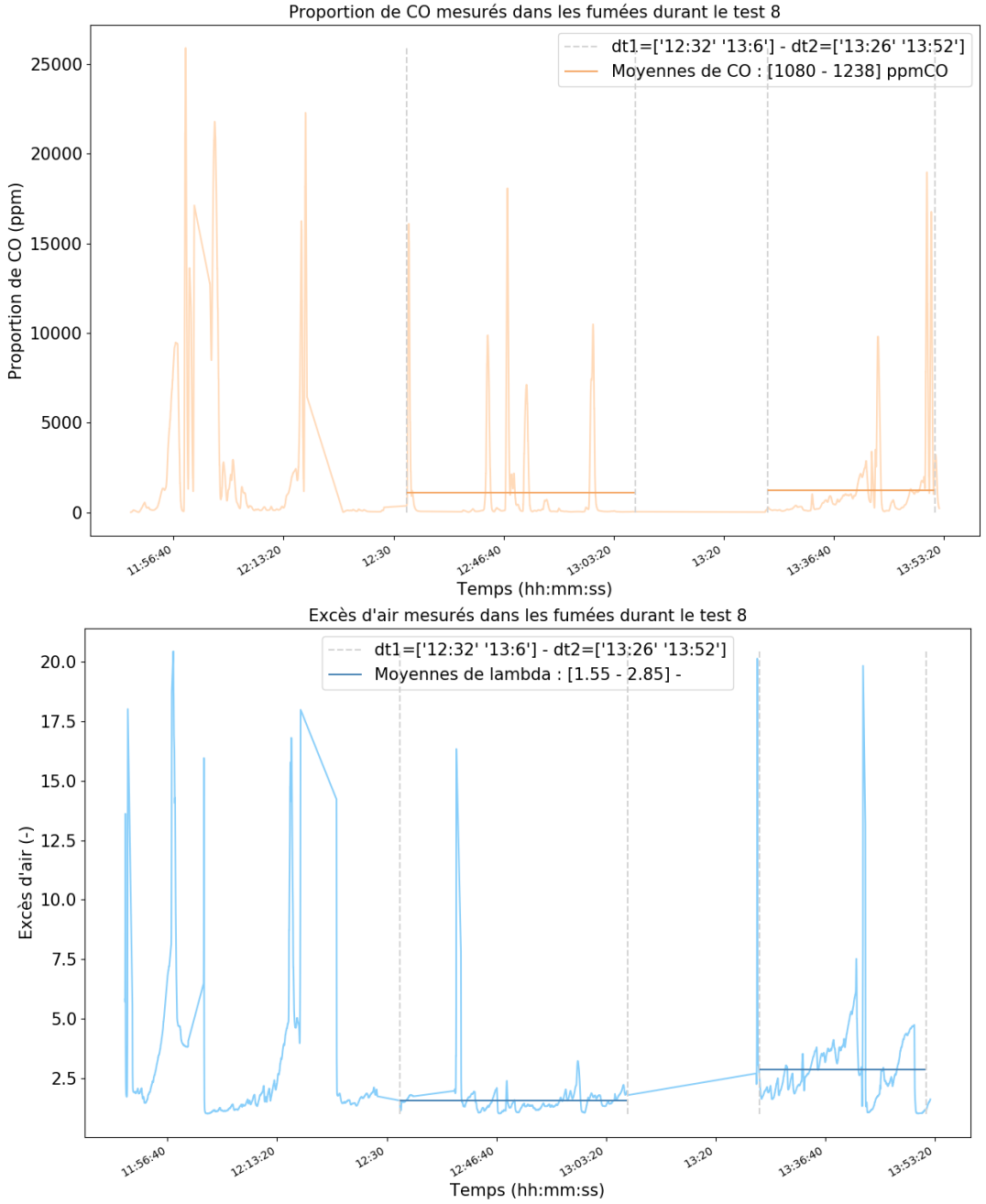


FIGURE E.20 – Données Testo de l'essai 8

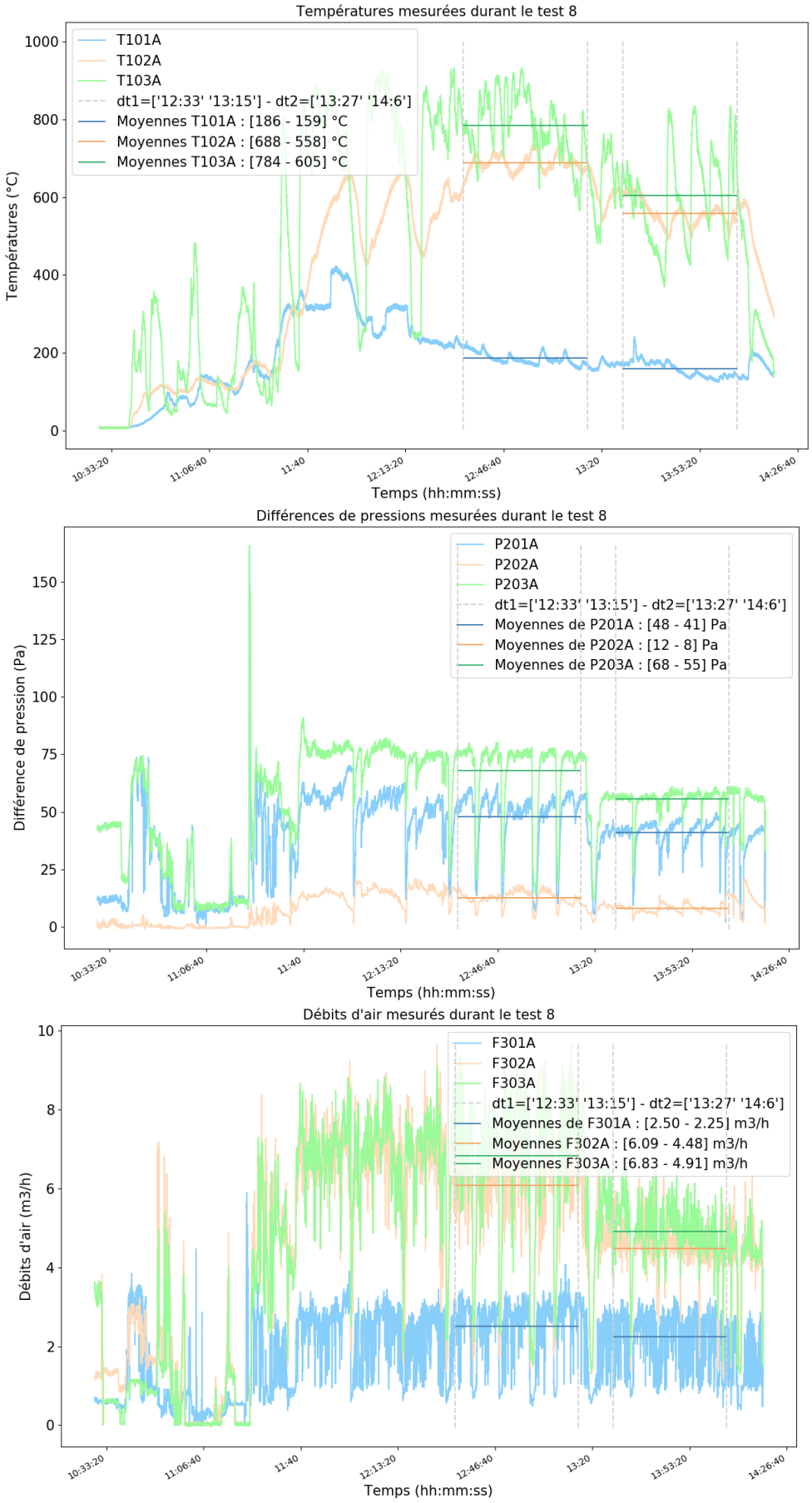


FIGURE E.21 – Données LabView l'essai 8

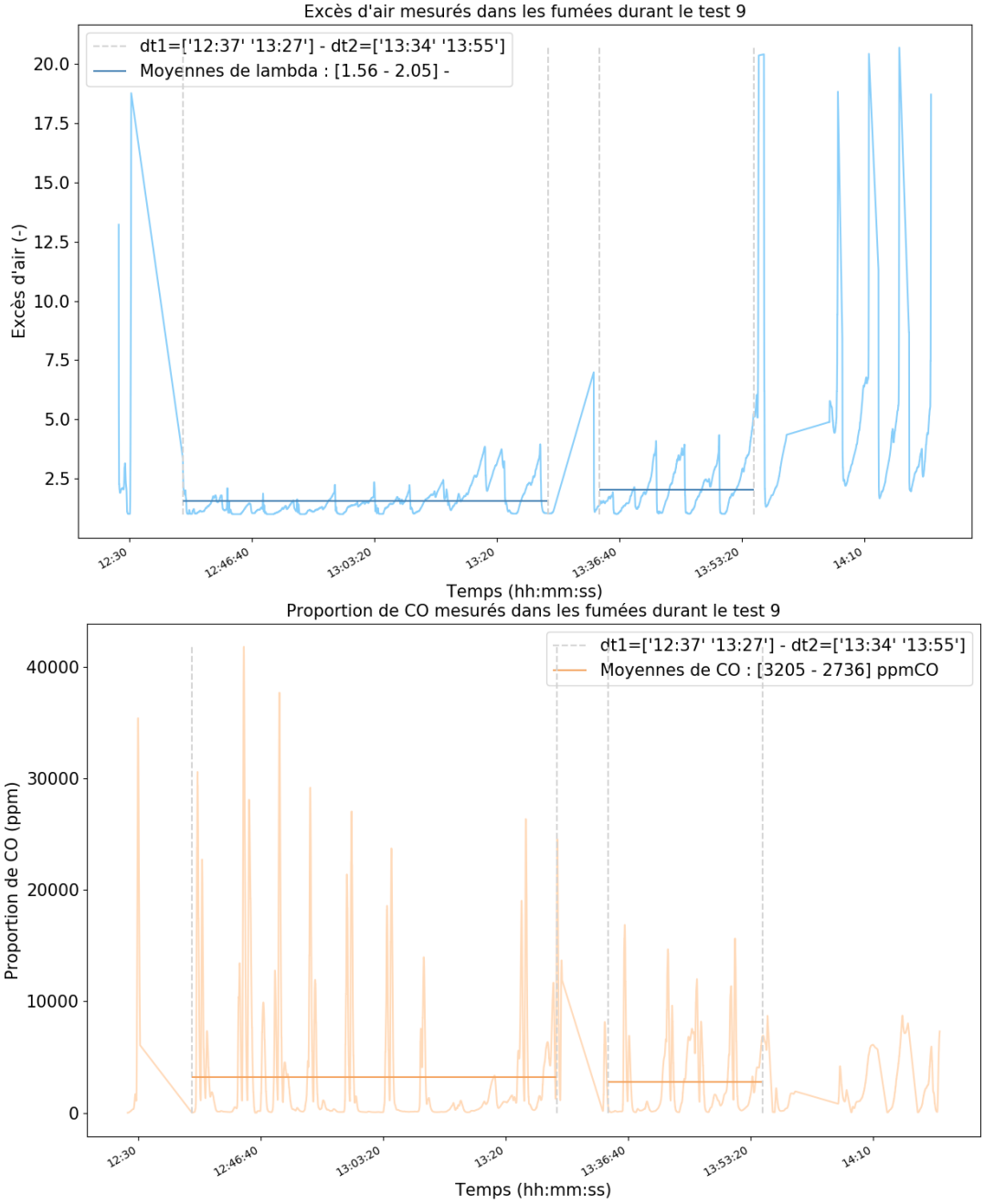


FIGURE E.22 – Données Testo de l'essai 9

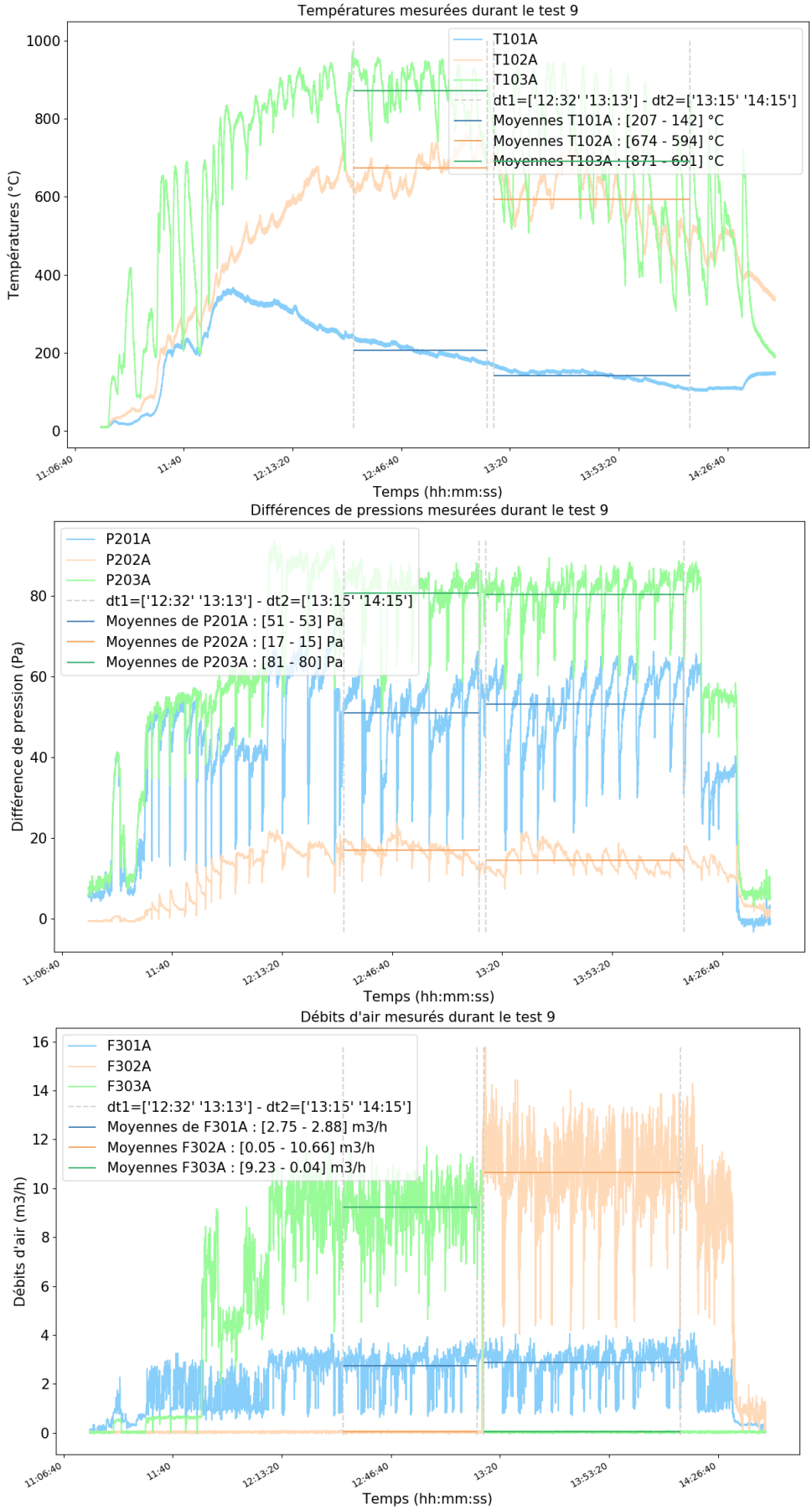


FIGURE E.23 – Données LabView de l'essai 9

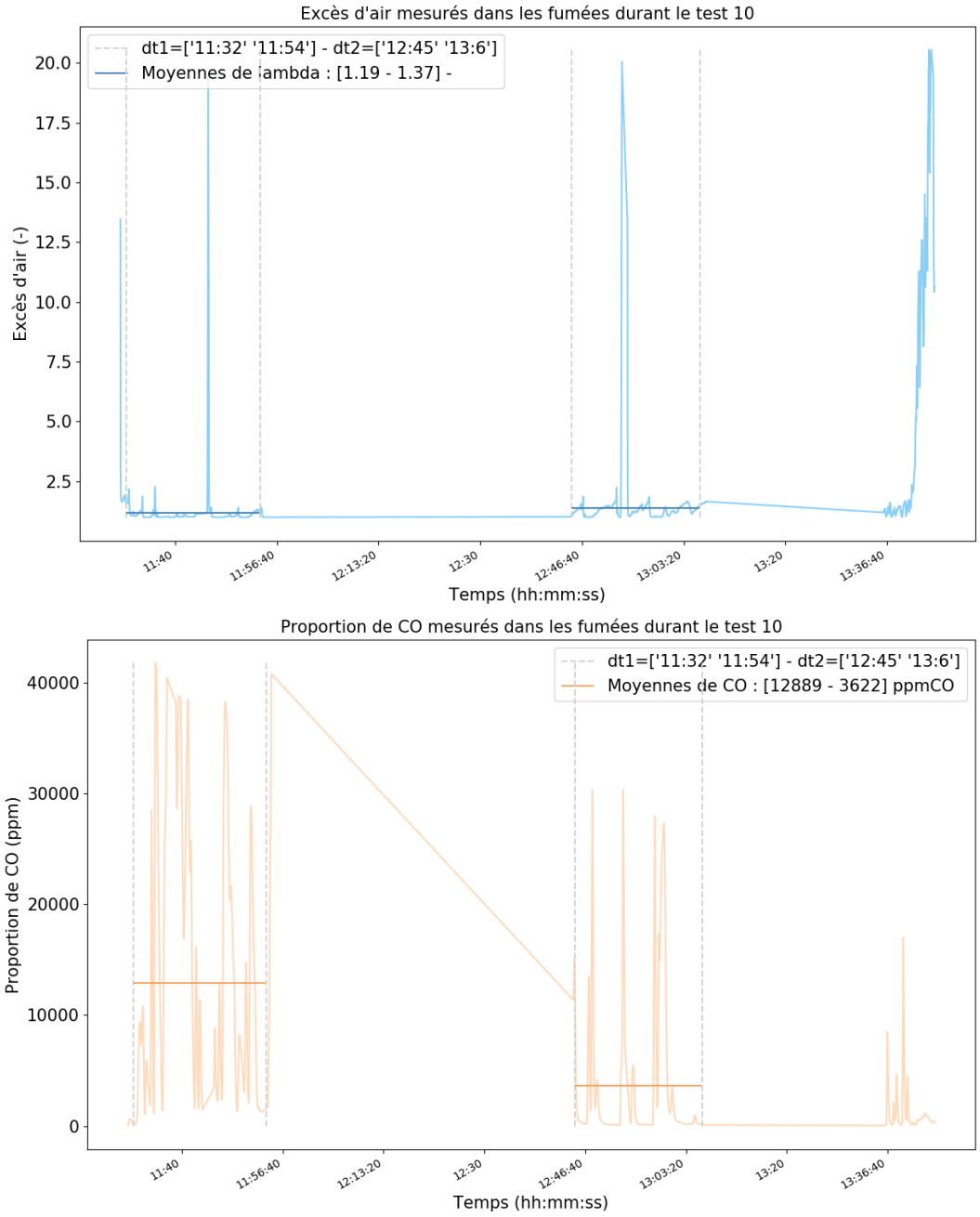


FIGURE E.24 – Données Testo de l'essai 10

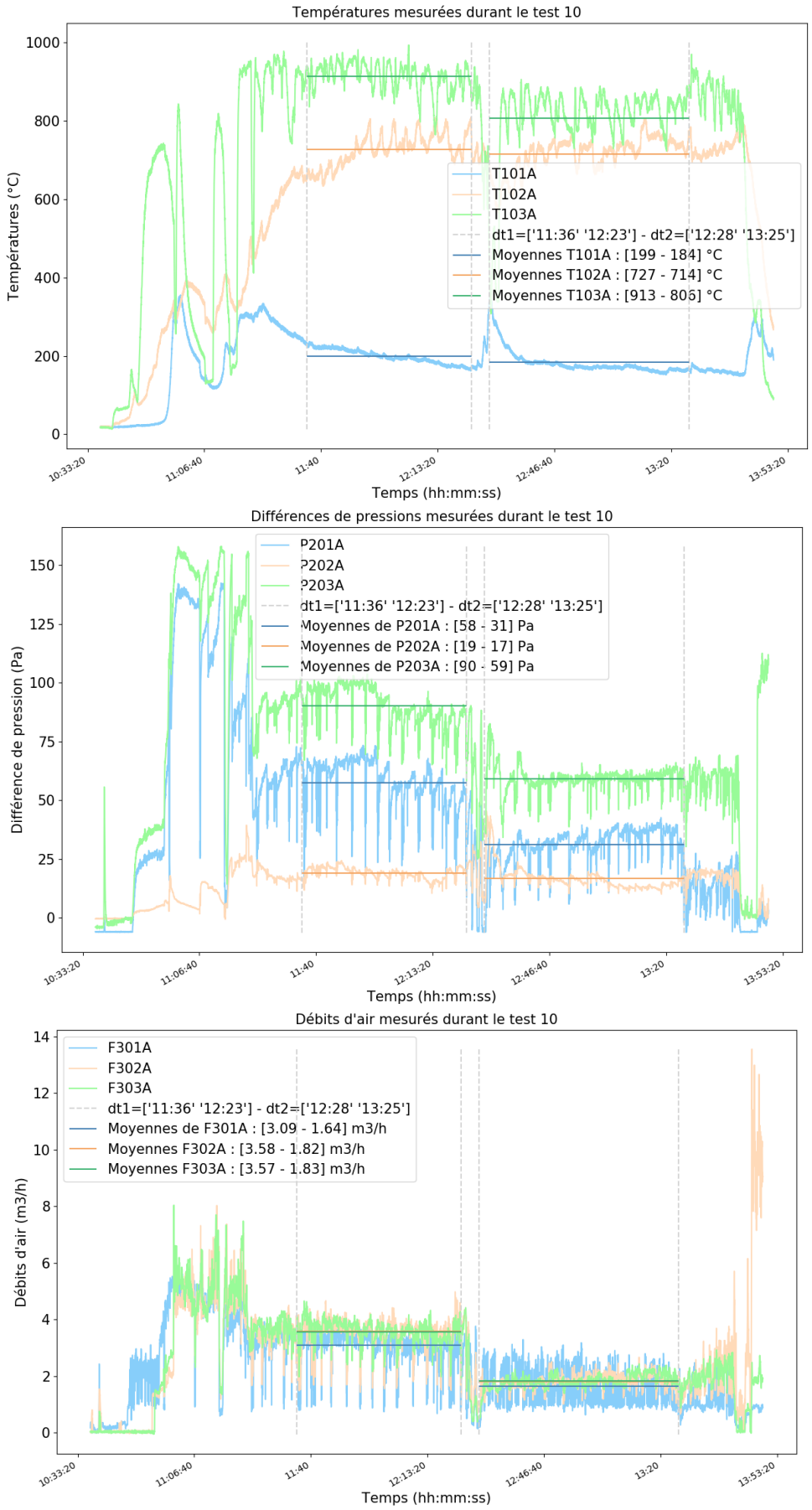


FIGURE E.25 – Données LabView de l'essai 10

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain
Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/epl**