



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



## **Rapport de Projet de Fin d'Etudes**

**- Promo 2016 -**

# **Caractérisation de la combustion de charbon de typha dans un foyer amélioré mauritanien**

**En partenariat avec le Gret**



**Guillaume TERRIER et Perrine VRIELYNCK**

**2015/2016**

**Enseignant responsable: Yann ROGAUME**



## **Remerciements**

Nous tenons d'abord à remercier notre enseignant responsable Monsieur Yann Rogaume de nous avoir offert la possibilité de travailler sur ce projet et de nous avoir soutenus d'un point de vue technique et humain.

Concernant le reste de l'équipe du Lermab, nous tenons à remercier Benoit Brandelet, Matthieu Debal, Baptiste Colin, Jérôme Lemonon, Gaétan Rivere, Pierre Girods, et Stéphane Aubert pour leur constante présence.

Nous remercions tout particulièrement les membres de l'atelier de l'école qui ont su se montrer attentifs à nos demandes et très pédagogues. Ils n'ont pas construit le banc d'essais et les équipements liés aux améliorations pour nous, nous les avons faits ensemble. Jean Jacques Balan, John Thomas, Cyril ainsi que Bruno, merci à vous de nous avoir fait confiance et de nous avoir enseignées les maîtrises d'un domaine qui n'est pas celui de l'école, entre autre la chaudronnerie.

Enfin, merci à Babana Mohamed Lemine pour les informations qu'il nous a apporté tout au long de notre projet et à Julien Cerqueira pour nous avoir fourni le foyer et le charbon de typha.

## **Contenu**

I.	Introduction.....	5
II.	Domaine de l'étude .....	6
1.	La Mauritanie .....	6
a.	Géographie .....	6
b.	Démographie .....	6
c.	Ressources forestières .....	6
2.	Le typha .....	7
a.	Typha australis.....	7
i.	Barrage de Diama .....	7
ii.	Valorisation du Typha.....	8
3.	La production de charbon de typha .....	8
a.	Récolte et séchage .....	9
d.	Procédé artisanal.....	9
e.	Procédé industriel .....	9
4.	Le GRET.....	9
5.	Les foyers.....	10
a.	Généralités .....	10
a.	Foyer mauritanien .....	10
iii.	Description .....	10
iv.	Utilisation .....	11
III.	Conception du banc d'essai.....	11
IV.	Caractérisation du combustible .....	14
1.	Humidité.....	14
2.	Analyse élémentaire.....	14
3.	Taux de cendres.....	15
4.	Pouvoir calorifique .....	15
a.	Pouvoir calorifique supérieur .....	15
b.	Pouvoir calorifique inférieur .....	16
V.	Tests relatifs au charbon de bois.....	17
1.	Test des braises .....	19
5.	Test allumage .....	22
a.	Papier.....	22
c.	Petits bois .....	23

## Introduction

d.	Carton.....	24
a.	Temps d'allumage .....	24
b.	Emission de monoxyde de carbone .....	25
6.	Test d'ébullition de l'eau .....	27
a.	Méthode globale .....	30
b.	Méthode avec quantification de la répartition des pertes .....	31
7.	Test d'analyse du sens du flux gazeux.....	34
8.	Première modification du foyer .....	39
9.	Test d'optimisation du flux d'air entrant .....	40
10.	Deuxième modification du foyer.....	42
VI.	Tests relatifs au charbon de typha .....	45
1.	Tests d'ébullition sans modifications du foyer.....	45
2.	Tests d'ébullition avec les modifications : Grille et collerette. ....	47
3.	Augmentation de la section d'arrivée d'air .....	48
VII.	Conclusion .....	49
VIII.	Bibliographie.....	50
IX.	Annexes .....	51

## **I. Introduction**

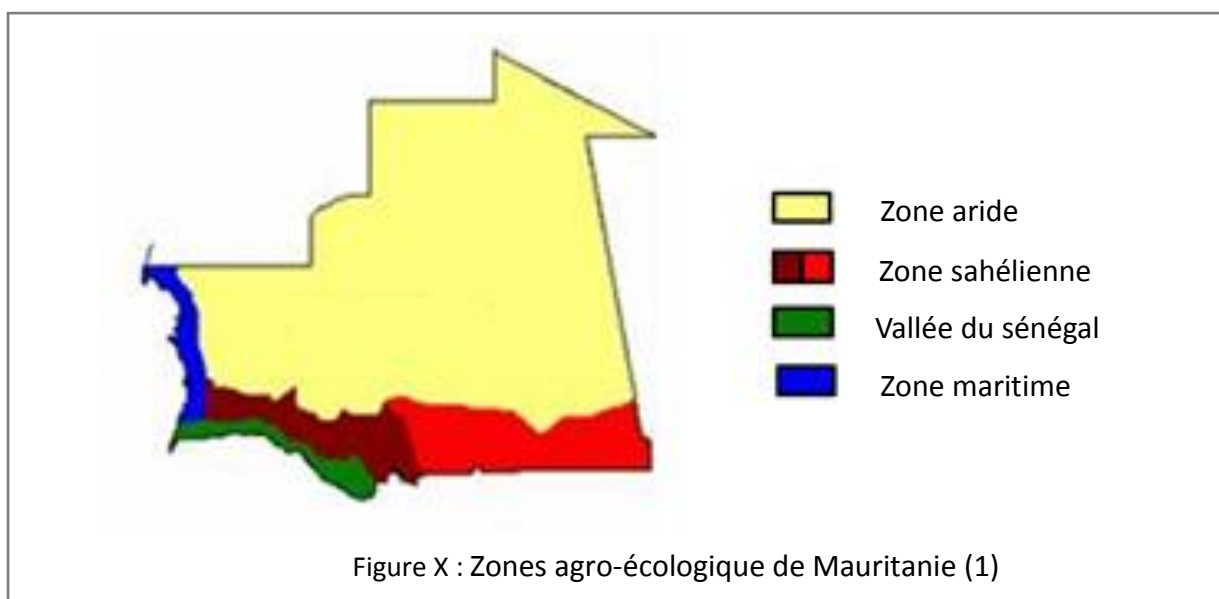
Depuis la mise en place du barrage de Diama sur le fleuve Sénégal, on a pu observer la prolifération du *Typha Australis*. Cette plante a des impacts néfastes sur l'environnement et est très difficile à éliminer. Afin de remédier aux problèmes liés à l'invasion de cette plante, de nombreuses études ont été menées au Mali, au Sénégal et en Mauritanie afin de trouver des utilisations possibles de cette biomasse. L'une de ces études concerne la valorisation énergétique du *Typha* par le biais de sa transformation en charbon. Cette solution permet de garantir l'accès à l'énergie des populations et de réduire la consommation importante de bois de ces pays. La mission de promotion du charbon de *Typha* a été confié à l'Institut Supérieur d'Enseignement Technique (Iset) de Rosso, l'association Gret et le Parc national du Diawling. Grâce à ce projet, des unités de production artisanales et industrielles ont vu le jour dans la vallée du Sénégal, permettant ainsi la fabrication locale du combustible. Des études ont déjà été réalisées pour déterminer les caractéristiques du charbon de *Typha*. Le charbon est essentiellement utilisé en cuisine, et pour que son emploi soit optimal il faut que l'appareil utilisé soit adapté. Notre projet consiste à étudier un foyer amélioré mauritanien dans le but de caractériser la combustion du charbon dans cet appareil et d'apporter des axes d'amélioration.

## II. Domaine de l'étude

### 1. La Mauritanie

#### a. Géographie

La Mauritanie est un pays d'Afrique de l'Ouest, sa superficie totale est de 1,03 millions d'hectares. Les 2/3 du territoire sont occupés par le Sahara, au sud du pays le fleuve Sénégal forme une frontière naturelle avec le Sénégal. On peut distinguer 4 zones géographiques : le Sahara au nord, le Sahel au sud, la côte atlantique et la vallée du Sénégal.



#### b. Démographie

La population de Mauritanie s'élève à 4.08 millions d'habitants (2) et se concentre principalement au sud du pays. En effet, le fleuve Sénégal permet une irrigation des terres ce qui rend la vallée propice à l'agriculture, c'est pourquoi la population s'y concentre.

#### c. Ressources forestières

Les forêts de Mauritanie sont présentes sur 238 500ha (3). Elles représentent moins de 1% de la superficie totale et se concentrent au sud, le long du fleuve Sénégal. Le long de la côte on trouve principalement des arbustes buissonneux. Le bois est donc une ressource rare pour ce pays. Or la consommation annuelle du bois énergie a été estimée en 1997 à

362 900t pour un taux d'accroissement de 0.16m<sup>3</sup>/ha (4). Il est donc impératif de limiter la consommation de cette ressource et de promouvoir d'autres types de combustibles.

## 2. Le typha

### a. *Typha australis*

Le typha est une plante vivace qui forme des lits denses de végétation. Il se développe dans des milieux humides et aquatiques tropicaux, subtropicaux et méditerranéens et supporte jusqu'à 2% de salinité. Ce roseau possède deux modes de propagation : la multiplication par ses rhizomes et la reproduction. Cette dernière se fait par le biais de graines qui se forment dans des chandelles.



Figure X : Plantes et chandelles de Typha (5)

Chaque chandelle peut contenir 20 000 à 700 000 graines, celles-ci peuvent rester dormantes 14 mois et être transportées sur une centaine de kilomètres. Ces deux méthodes peuvent être alternatives ou simultanées, ce qui donne un fort pouvoir colonisateur à la plante. De plus c'est une espèce hautement compétitive : elle s'accapare toutes les ressources disponibles aux dépens des autres espèces ce qui entraîne des effets néfastes sur la biodiversité. Toutes ces caractéristiques lui confèrent un pouvoir colonisateur important. En outre il n'existe pas d'ennemi naturel au typha et son élimination reste très difficile.

#### i. Barrage de Diama

Le fleuve Sénégal est caractérisé par des variations importantes de débits selon les saisons et des remontées d'eau saline jusqu'à 200km de l'embouchure. Ceci constitue des

obstacles à la pratique de l'irrigation des terres agricoles. Afin de garantir une quantité d'eau douce pour l'agriculture et l'alimentation en eau potable des centres urbains, un barrage a été construit à 26km en amont de la ville de Saint-Louis. La mise en place du barrage anti-sel de Diama a entraîné un changement profond de l'environnement. En effet, la diminution du taux de salinité de l'eau a permis la prolifération de plantes aquatiques dont le Typha australis. On note de nombreuses conséquences néfastes sur l'environnement : diminution de la teneur en oxygène de l'eau, développement d'habitats pour des insectes porteurs de maladie (paludisme)(6). Le développement de ces plantes entraîne également des difficultés pour pratiquer certaines activités : pêche, accès à l'eau pour le bétail...

De plus le Typha se développe rapidement : sa progression annuelle en surface est de 8 à 10% et sa biomasse peut atteindre 150t/ha. Son élimination étant très difficile, il est impératif de trouver des solutions pour utiliser cette ressource et limiter ses impacts.

## **ii. Valorisation du Typha**

Le typha peut être utilisé dans plusieurs domaines : matériau, construction et énergie principalement (5). En effet, il est possible de produire de la colle avec l'amidon contenu dans ses rhizomes dont on utilise aussi les fibres pour fabriquer des liants et cordes. On peut tirer des graines des huiles, et les fibres des aigrettes servent à renforcer les céramiques et mortiers. De plus, le typha est à la base de nombreux produits de construction comme des poutres, plaques et panneaux d'isolation. Ces produits sont très intéressants puisqu'ils pourraient être exportés vers l'Europe. Enfin il est possible de valoriser le typha en le carbonisant et obtenir un produit pouvant remplacer le charbon de bois.

Ainsi toutes les parties du typha peuvent être valorisées, de plus cette plante possède un rendement très élevé. C'est pourquoi en plus de valoriser le typha déjà disponible, il est même question de développer sa culture afin de produire ces divers produits.

## **3. La production de charbon de typha**

Deux modes de production de charbon de typha se distinguent : Le procédé artisanal et le procédé industriel.

Ils ont tous les deux besoins de typha séché qui est récolté, quel que soit le procédé, de la même manière.

### **a. Récolte et séchage**

La coupe mécanique étant trop chère, le typha est récolté manuellement par des coupeurs équipés de protections pour éviter les coupures et les maladies telles que la Bilharziose.

Il est ensuite étalé, à proximité du site de coupe, par paillis de 15 cm qui sont retournés quotidiennement jusqu'à l'obtention d'une biomasse à 30% d'humidité brute (7 à 10 jours).

### **d. Procédé artisanal**

La carbonisation artisanale se réalise dans des réacteurs « 3 futs ». Ils sont facilement transportables et permettent au charbonnier d'opérer à côté du champ de séchage. Une fois le typha carbonisé, il est ensuite mélangé à de l'eau et un liant tel que de la balle de riz, de l'argile ou de la gomme d'acacia puis passe dans une presse à extrusion pour obtenir des briquette de charbon. Ces briquettes sont séchées sur des claies au soleil.

### **e. Procédé industriel**

Le procédé industriel, quant à lui, consiste à réaliser les briquettes avant la carbonisation. Le typha est broyé, puis mélangé avec de la balle de riz (mélange 50/50). Le mélange passe ensuite dans une presse à extrusion électrique puis il est carbonisé.

## **4. Le GRET**

Le Gret est une association qui mène des actions pour le développement solidaire et la lutte contre la pauvreté et les inégalités dans le monde. Elle travaille en lien avec les populations locales, les acteurs économiques et les institutions publiques. Elle mène des travaux selon différentes thématiques dont la gestion des ressources et de l'énergie. Ces travaux visent entre autre à développer des énergies durables, stables économiquement et adaptées aux besoins des populations tout en prenant en compte les impacts environnementaux. Dans ce cadre, le Gret a développé en partenariat avec l'Institut supérieur d'enseignement technique (Iset) de Rosso et le Parc national du Diawling, une mission autour de la production de charbon de typha en Mauritanie. Ce projet a permis la mise en place d'unités locales de production de charbon et le développement de la fabrication de charbon.

## 5. Les foyers

### a. Généralités

Il existe une multitude de foyers différents. On peut classer les foyers en deux catégories : les foyers « traditionnels » qui correspondent à une technologie qui s'est développée sans aide extérieure alors que les foyers « améliorés » correspondent à une technologie développée par un organisme extérieure dans le cadre d'un programme de développement (7). On peut les distinguer selon le matériau utilisé pour leur fabrication :

- **Les foyers « 3 pierres »** consiste à déposer 3 pierres autour du feu afin d'y déposer la marmite. Cette technique est l'une des plus rudimentaires et des moins performantes.
- **Les foyers massif avec ou sans cheminée** : fabriqués le plus souvent en pierre ou en argile.
- **Les foyers portables en céramique ou métallique**

Souvent le foyer est conçu avec des matériaux disponibles dans l'environnement et connu des villageois. La fabrication de ses foyers est majoritairement artisanale, dans peu de cas ils sont réalisés par de petites industries locales. Dans le cas de fabrication artisanale, ce sont les femmes et utilisateurs des foyers ou des artisans qui réalisent le foyer, dans certain cas ils sont formés à la technique de fabrication par des associations dont le but est de promouvoir le foyer. Les foyers n'utilisent pas le même type de combustible, les principaux combustibles sont la biomasse, le charbon, le pétrole et le gaz. Ces foyers se trouvent aussi bien à l'intérieur des habitations que dehors avec une protection ou non. Ceci peut devenir gênant au niveau des émissions de polluants dans le premier cas et pour la performance de la combustion dans le second cas.

Le plus souvent, chaque famille possède son propre foyer. Il existe tout de même des foyers « institutionnels » qui permettent de faire à manger pour plusieurs familles, voir le village.

### a. Foyer mauritanien

#### iii. Description

Le foyer étudié est un foyer amélioré du type malgache. Il est constitué de tôle de récupération et sa conception est plutôt simple. Il est fabriqué de façon artisanale avec des outils courants : ciseaux, marteaux, burins, pince. C'est un foyer multi-marmites c'est-à-dire qu'il doit permettre l'utilisation de différents types de récipients.

#### iv. Utilisation

Pour les utilisations avec le charbon de typha, le combustible est déposé sur la plaque et la marmite repose directement sur le charbon comme sur la figure X. En général pour un repas, 1 kg de charbon de typha est nécessaire.



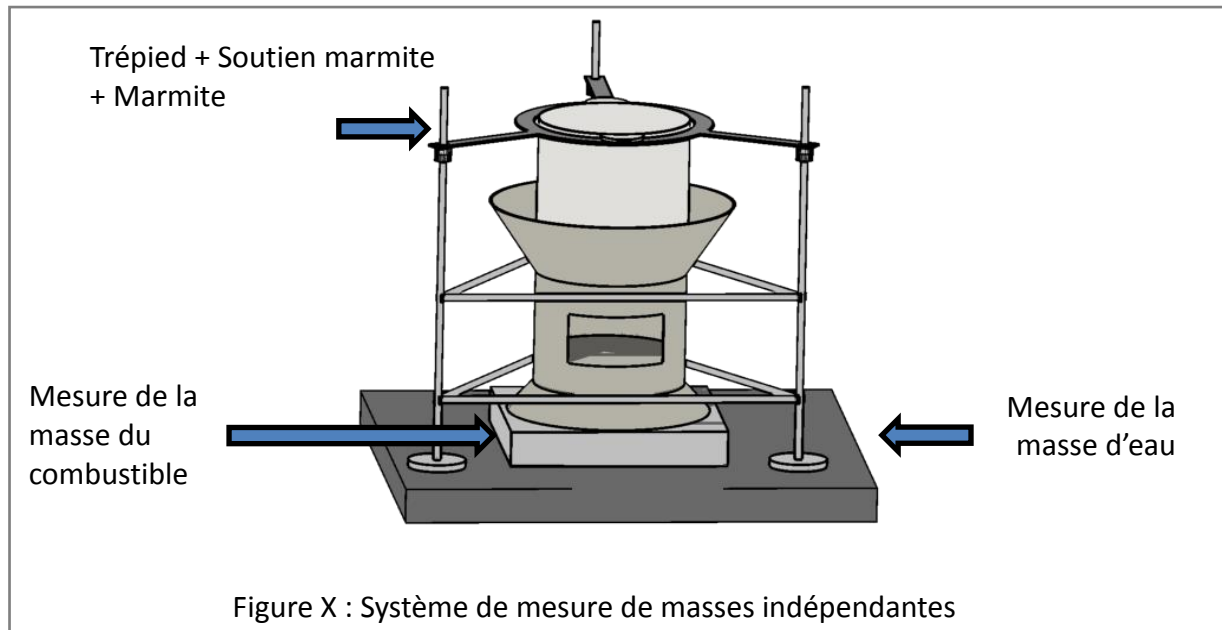
Figure X : Utilisation du foyer

### III. Conception du banc d'essai

La conception du banc d'essai est la première tâche à laquelle nous nous attelons. Nous avons les plans du foyer (Cf. Annexe) ce qui nous permet de réaliser le dimensionnement précis des différents éléments de celui-ci. Le test d'ébullition de l'eau est le test sur lequel nous nous choisissons de nous baser pour la conception.

Tout d'abord, nous voulons mesurer la masse d'eau indépendamment de la masse de combustible. C'est pourquoi nous décidons de concevoir un trépied sur lequel reposeront uniquement l'eau et son contenant.

La mesure des masses se fait avec deux balances. L'une mesure la masse de tout le système. La seconde mesure uniquement la masse du combustible. Par différence nous obtenons la masse d'eau.



Le soutien de la marmite est volontairement affiné pour qu'il modifie le moins possible la trajectoire des fumées de combustion.

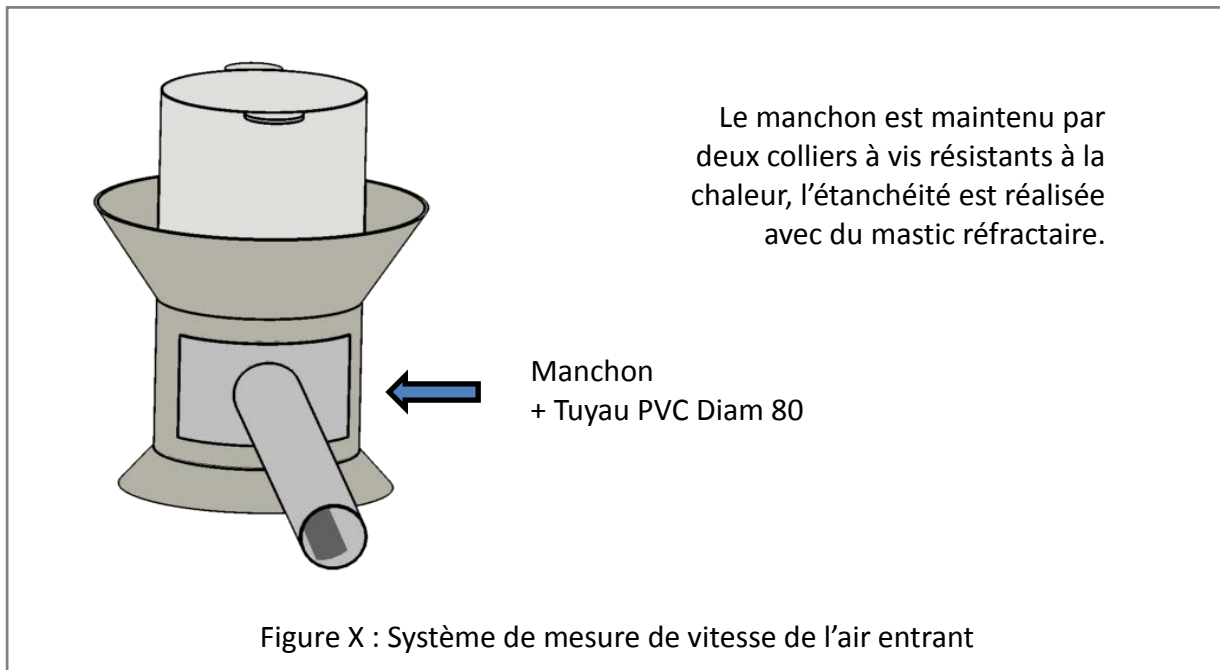
Maintenant que le système de mesure des masses est dimensionné, il nous reste à concevoir le système de captation des fumées.

Deux choix s'offrent à nous. Soit nous enfermons le foyer dans une enceinte entièrement étanche, soit nous réalisons une hotte aspirante.

De peur de créer un effet « four » due au confinement de l'atmosphère chaude et par conséquent de modifier le comportement du foyer, nous décidons de réaliser une hotte aspirante. Le tirage sera naturel.

L'inconvénient de la hotte aspirante est que le système dilue beaucoup les fumées avec l'air ambiant. Or, nous aimerions quantifier le flux de dioxygène afin de pouvoir réaliser des calculs théoriques autour de l'équation de combustion. Nos chances de calculer un facteur de dilution correct sont quasi nulles, on ne peut donc pas quantifier l' $O_2$  dans les fumées. Nous devons donc connaître la quantité d'air entrant.

Pour ceci un manche en acier viendra épouser le foyer au niveau de son orifice d'arrivée d'air. Nous venons y emmancher un tube en PVC dans lequel un anémomètre mesurera la vitesse de l'air.



Dès la réception du foyer, nous commençons l'élaboration du banc d'essai. John Thomas nous réalise le trépied, le soutien marmite et le manchon. Nous prenons en charge la construction de la hotte. Les quatre morceaux de tôle sont assemblés par rivetage et l'étanchéité est assurée par du ruban adhésif en aluminium. La hotte reposera sur un cadre en fer.



En ce qui concerne l'acquisition des données, nous avons besoin des éléments suivants :

- ✚ 5 thermocouples de type k (de -50 à +1100°C)
- ✚ 2 balances précises au centième de kilogramme
- ✚ Un anémomètre à hélice (vitesse < 1m/s)
- ✚ Un Testo
- ✚ Un capteur différentiel de pression

## IV. Caractérisation du combustible

Il est utile pour nos calculs de connaître certaines caractéristiques des combustibles utilisés. Elles sont les suivantes : Humidité, analyse élémentaire, pouvoir calorifique et taux de cendres.

### 1. Humidité

L'humidité des matériaux se calcule grâce à la formule suivante :

$$H = \frac{m_{humide} - m_{anhydre}}{m_{humide}} * 100$$

Pour obtenir la masse anhydre, on place les échantillons à l'étuve à 180°C pendant 24h (on vérifie que la masse se stabilise pour s'assurer d'être à l'état anhydre). Ainsi on détermine que l'humidité du charbon de typha est de 2.7% et celle du charbon de bois à 3.3%.

### 2. Analyse élémentaire

L'analyse élémentaire permet de calculer le PCI à partir du PCS et surtout d'écrire l'équation de la combustion. Nous utilisons les résultats suivants obtenus dans différentes études :

		Charbon de bois	Charbon de typha	
Analyse élémentaire	C	80	78	%
	H	12	3.11	%
	O	8	17.71	%
	N	0	1.18	%

Figure : Analyses élémentaires des charbons

### 3. Taux de cendres

La masse de cendres est obtenue après la combustion de l'échantillon de charbon anhydre dans un four à moufle durant 24h. Ainsi on peut calculer le taux de cendres selon la formule suivante :

$$\text{Taux de cendres} = \frac{m_{\text{cendres}}}{m_{\text{anhydre initiale}}} * 100$$

Pour les échantillons de Typha on trouve un taux de cendres de 38%. Cette valeur est élevée mais normale pour du charbon fabriqué à partir de roseau.

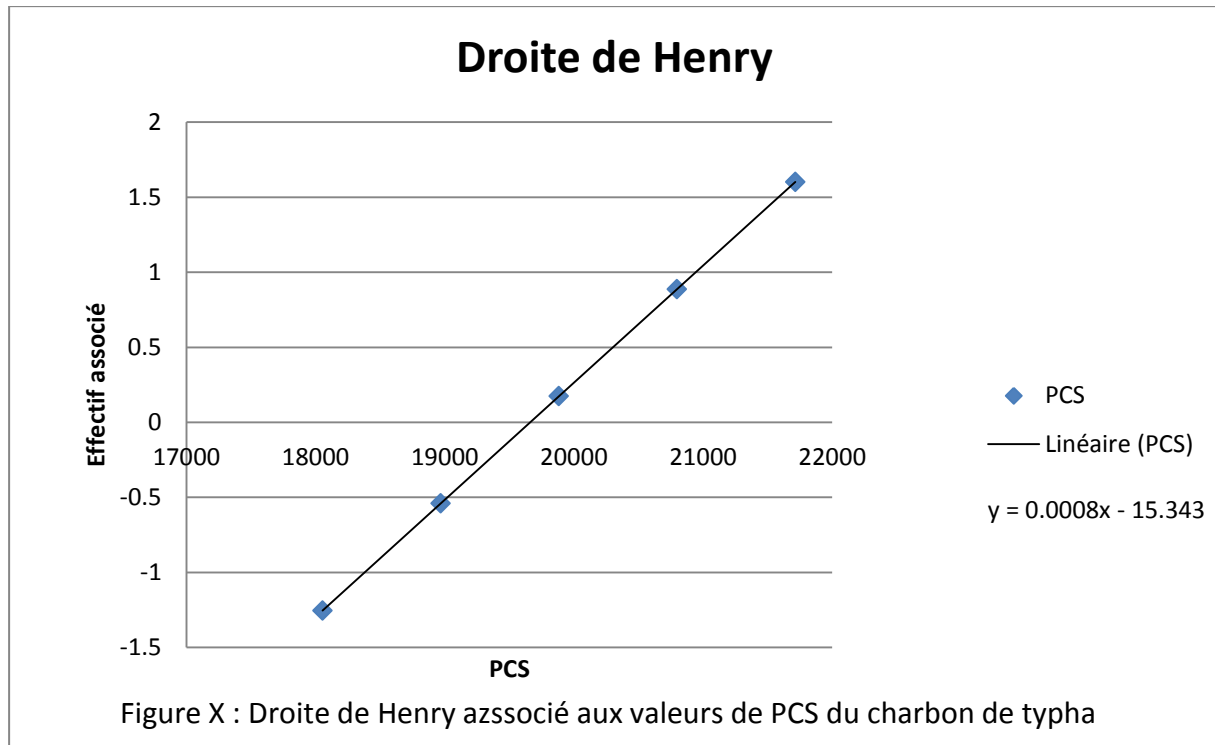
### 4. Pouvoir calorifique

#### a. Pouvoir calorifique supérieur

Le pouvoir calorifique est une donnée thermochimique du combustible très importante. Il permet de connaître l'énergie libérée lors de la combustion.

Afin de déterminer cette caractéristique on utilise une bombe calorimétrique (6100 calorimeter- Parr). Un échantillon de charbon anhydre dont on connaît la masse est placé dans la bombe calorimétrique que l'on remplit d'O<sub>2</sub>. Cette bombe est placée dans un seau rempli de 2L d'eau. Une combustion est lancée et on mesure l'élévation de température de l'eau. Connaissant la capacité calorifique de l'eau, on retrouve le PCS du combustible. Cette donnée est directement donnée par le calorimètre.

Nous réalisons d'abord ce test sur un petit nombre d'échantillons différents. Nous obtenons des résultats très différents : la fabrication du charbon de typha ne permet pas d'obtenir du charbon possédant des caractéristiques homogènes d'une bûche à l'autre. Nous réitérons le test sur un nombre plus important d'échantillons. Nous voulons avec nos 19 résultats vérifier que les valeurs du PCS suivent bien une loi normale. Pour cela nous utilisons la méthode de la droite de Henry : nous déterminons les classes ainsi que les effectifs associés puis nous traçons le graphique suivant :



La courbe des effectifs associés en fonction du PCS moyen de la classe correspondante est bien une droite : cela signifie que les valeurs du PCS suivent une loi gaussienne. A l'aide de ce graphique on peut obtenir la moyenne de la série : le point d'intersection de la courbe de Henry et de l'axe des abscisses correspond à la valeur de la moyenne.

Ici, l'équation de la droite de Henry est :

$$t = 0.0008 * PCS - 15.343$$

On en déduit la moyenne :

$$\overline{PCS} = \frac{15.343}{0.0008} = 19\,179 \text{ kJ/kg}$$

Pour le reste de notre projet nous utiliserons la valeur moyenne de 19 179 kJ/kg pour l'étude du charbon de typha.

## b. Pouvoir calorifique inférieur

A partir de cette valeur, on peut déterminer le pouvoir calorifique inférieur sec (PCIs) et humide (PClh) qui prennent en compte l'énergie que l'on perd pour la vaporisation de l'eau formée à partir des molécules d'hydrogène du charbon et celle déjà contenue dans le combustible.

On utilise cette formule pour calculer le PCIs :

$$PCI_s = PCS - \frac{\%H}{100} * 9 * L_{vap\ eau}$$

Avec  $\%H$  le pourcentage massique d'hydrogène dans le charbon et  $L_{vap\ eau}$  l'enthalpie de vaporisation de l'eau. A partir de cette valeur, on calcule le  $PCI_h$  suivant la formule suivante :

$$PCI_h = \frac{(100 - H)}{100} * PCI_s - H * L_{vap\ eau}$$

On obtient donc les résultats suivants que nous utilisons pour l'exploitation des résultats des expériences :

	Charbon de bois	Charbon de typha	
PCS	34000	19179	kJ/kg
PCIs	31288	18476	kJ/kg
PCIh	30425	18045	kJ/kg

Figure X : Caractéristiques des charbons

## V. Tests relatifs au charbon de bois

En Mauritanie, le foyer est utilisé avec du charbon de typha. Nous en avons reçu 13 kilogrammes. Afin d'économiser celui-ci, nous choisissons de réaliser tous nos tests sur du charbon de bois. Ses tests permettront de connaître le comportement du foyer et de proposer des axes d'amélioration.

Nous réalisons dans l'ordre les tests suivants :

**Tests des braises** : Caractérisation de la combustion et du comportement du foyer.

**Tests d'allumage** : Définition du meilleur allumage.

**Tests d'ébullition de l'eau** : Définition des paramètres de combustion et du rendement global de l'installation.

Tests relatifs au charbon de bois

**Tests d'analyse du sens du flux gazeux :** Relatif à l'analyse du tirage, le but est d'identifier si le flux est montant, descendant ou les deux.

**Première modification :** Changement de la plaque de rétention des braises.

**Test d'optimisation du flux d'air entrant :** Contrôle du débit d'air pendant la phase de mijotage.

**Deuxième modification :** Ajout d'une collerette sur le foyer.

Une fois que le comportement du foyer est compris et que des améliorations sont trouvées, nous passons aux tests avec du charbon de typha, pour confirmer ou non, les résultats associés au charbon de bois.

Tous nos tests sont réalisés en extérieur pour mieux simuler l'utilisation réelle du foyer et empêcher d'enfumer les locaux de l'école.

## **1. Test des braises**

### ***Objectifs***

Le test consiste à brûler dans la totalité du charbon de bois pour observer le comportement général de la combustion mais aussi pour examiner la pertinence de notre banc d'essai.

### ***Protocole***

Nous utilisons la totalité du banc d'essai (Cf. Définition du banc d'essai) excepté le trépied et la marmite.

Nous plaçons une quantité de charbon de bois équivalente, d'un point de vue énergétique, à la quantité de charbon de typha introduite lors de l'allumage dans le foyer. Cette quantité est obtenue en connaissant la masse initiale de charbon de typha, le pouvoir calorifique de celui-ci ainsi que celui du charbon de bois. Il est important que le pouvoir calorifique utilisé soit le pouvoir calorifique inférieur sec car les deux combustibles n'ont pas les mêmes humidités.

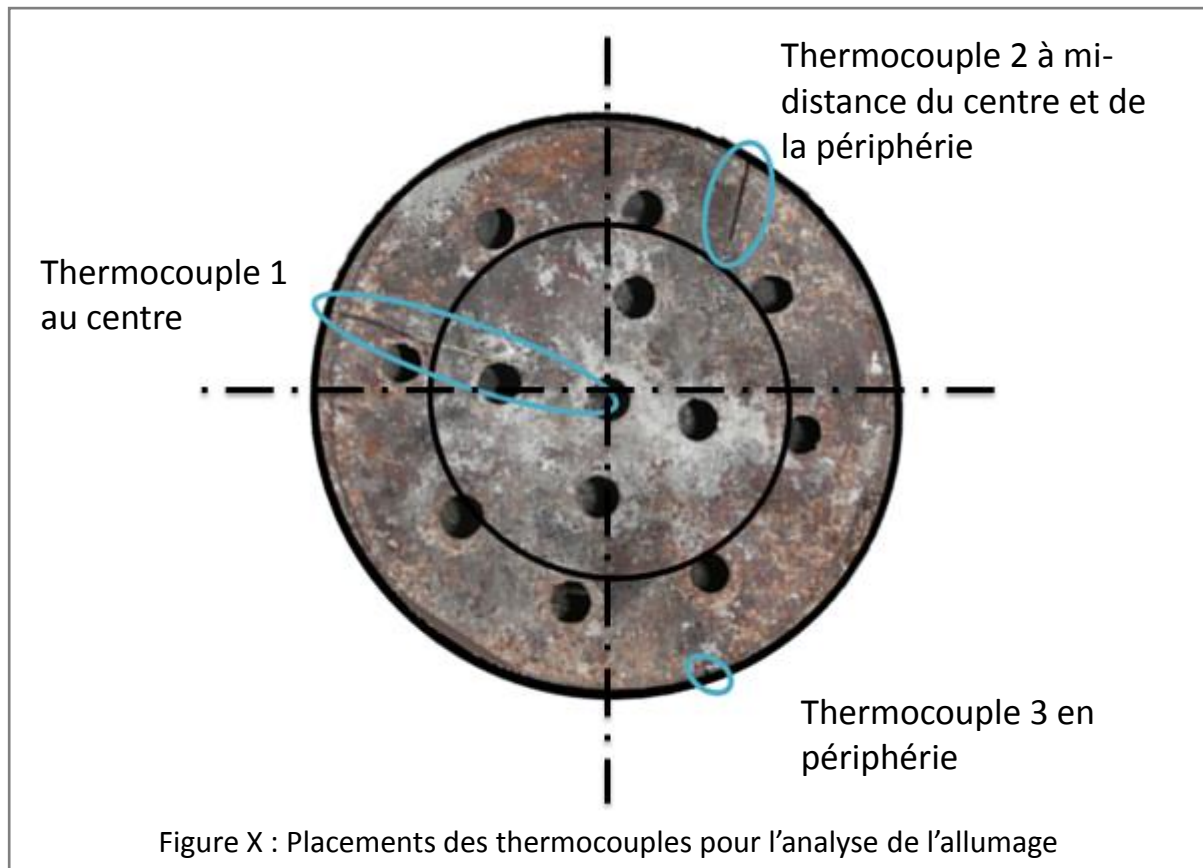
La masse de charbon de bois est fixée à 600 grammes.

L'allumage est effectué suivant la technique dite de la « bouteille » (Cf. Test d'allumage).

Lors de la combustion, il ne nous est pas possible de modifier la position des braises, sauf une fois, lorsque l'allumage est terminé pour homogénéiser le lit.

Il nous faut donc observer les paramètres de la combustion qui définissent la fin de l'allumage.

Pour ceci nous plaçons trois thermocouples dans le plan médian du lit de braises, plus ou moins excentrés suivant le schéma ci-dessous :



Ces capteurs de températures permettront également d'analyser le comportement de la combustion en fin de réaction.

### Résultats

Trois essais sont réalisés. Les résultats, sensiblement similaires, nous laissent penser que leur nombre est suffisant.

Nous constatons trois phases durant la réaction :

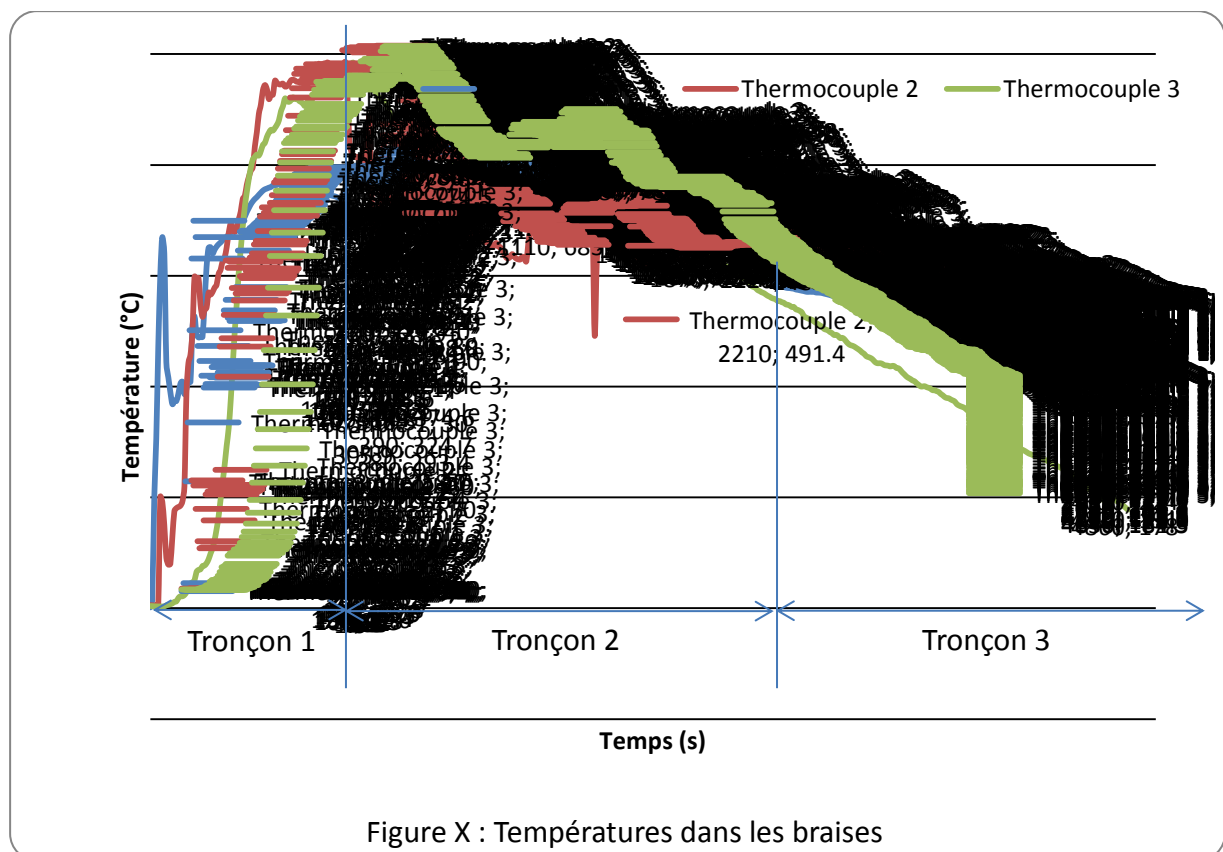
**Tronçon 1 :** Phase de mise en température. Au départ l'atmosphère du lit de braises est froide. La flamme du papier journal permet d'apporter l'énergie d'activation nécessaire pour que le combustible et le comburant puissent réagir, on parle alors de triangle du feu. Cette énergie est principalement transmise sous forme de rayonnement de la flamme vers le combustible (la convection et la conduction sont négligeables). Ce rayonnement a une portée limitée, c'est pourquoi on peut apercevoir un pic de température sur le thermocouple 1 (environ 670°C) et un pic moins élevé sur le thermocouple 2 (environ 200°C). Le rayonnement de la flamme du papier journal n'atteint pas la zone affectée au thermocouple 3.

Cette phase prend fin quand les températures commencent à atteindre leur maximum. A ce moment, nous tisonnons pour uniformiser les températures et la phase suivante prend place.

**Tronçon 2 :** Combustion hétérogène du charbon de bois. Durant cette phase, le comburant pénètre la matière carbonée pour pouvoir réagir avec celle-ci puis les gaz produits s'en échappent. Il y a donc deux flux gazeux dans la matière (flux opposés) qui rendent leur modélisation compliquée.

**Tronçon 3 :** Phase de refroidissement. Elle est due à l'épuisement de la matière carbonée dans le combustible. La réaction de combustion a toujours lieu mais délivre de moins en moins de puissance. Les braises en périphérie commencent à refroidir en premier

Nous obtenons des profils de températures comme ceci :



## 5. Test allumage

### *Objectifs*

Le principe de ce test est de comparer différents types d'allumage afin de choisir celui qui sera utilisé lors des expériences suivantes. En effet, l'allumage a une influence importante sur la qualité de la combustion, c'est pourquoi il ne faut pas la négliger. Lors de cette étape il est nécessaire d'utiliser un autre type de combustible afin d'allumer le charbon. Ce test va donc nous permettre de choisir un combustible ainsi qu'une méthode d'allumage associée. Nous basons notre comparaison sur les critères suivants :

- **temps de l'allumage** : il permet d'évaluer l'efficacité de l'allumage
- **facilité de mise en œuvre** : l'utilisation du foyer doit rester une activité simple
- **nature du combustible** : le combustible doit être un matériau facile à trouver
- **les émissions de CO** : il caractérise la qualité de l'allumage, c'est un critère très important pour la santé des utilisateurs qui utilisent généralement le foyer sans hotte et donc respirent directement les fumées de combustion.

### *Protocole*

Le test consiste à suivre l'évolution des températures et des émissions de CO lors d'un allumage. Les conditions de l'essai sont les mêmes que celles du test des braises. On débute le test en allumant la combustion dans le foyer. Celui-ci possède trois thermocouples (cf protocole test des braises) qui permettent de suivre l'évolution de la température des braises. La hotte placée au-dessus du foyer permet de capter les fumées et de les analyser à l'aide d'un TESTO. On arrête le test au bout de 20 min, après que les trois températures se soient stabilisées.

Nous déterminons au préalable les combustibles à tester à l'aide des informations obtenues auprès de nos contacts mauritaniens. Les combustibles doivent être des matériaux courants en Mauritanie. Nous choisissons donc de travailler à l'aide de papier, petits bois et carton. Les tests s'effectuent selon les méthodes décrites ultérieurement. Pour chaque expérience on utilise 600g de charbon de bois qui correspond à 1kg de charbon de typha.

#### **a. Papier**

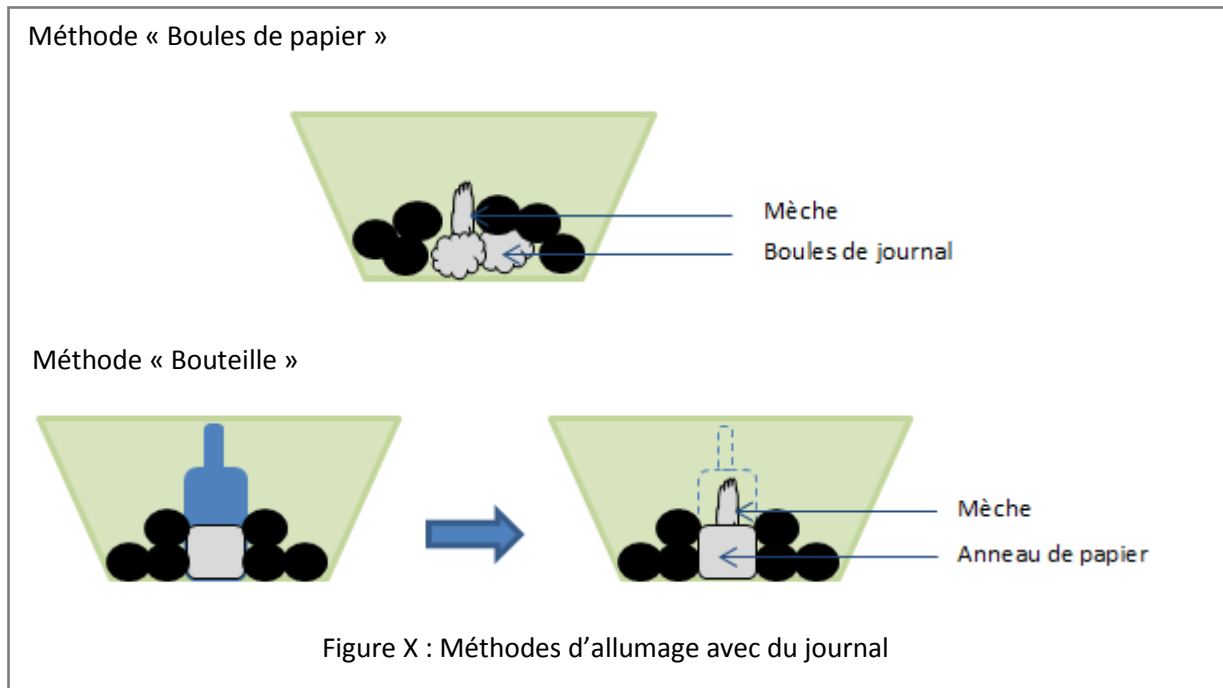
On a besoin de 40g de papier (5 feuilles de journal) et une feuille pour faire la mèche. On dispose le papier et le charbon selon les méthodes suivantes :

- Méthode « Boules de papier » :

On forme des boules avec les feuilles de papier que l'on recouvre du charbon.

- Méthode « Bouteille » :

Pour cette méthode on utilise une bouteille pour former un anneau avec le papier, une fois le charbon mis dans le foyer on retire la bouteille.



### c. Petits bois

On utilise 60g de bois de cagettes.

Les méthodes suivantes sont utilisées avec le petit bois :

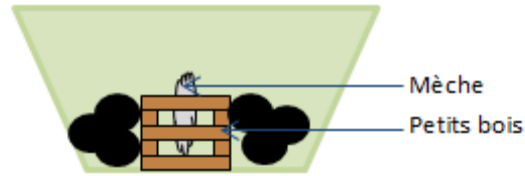
- Méthode « Tour creuse » :

On empile les petits bois en forme d'une tour creuse qui reçoit à l'intérieur une mèche composée d'une feuille de journal.

- Méthode « Tipi » :

On froisse une feuille de journal en boule sur laquelle repose les petits bois pour former un tipi. On allume directement les petits bois.

Méthode « Tour creuse »



Méthode « Tipi »

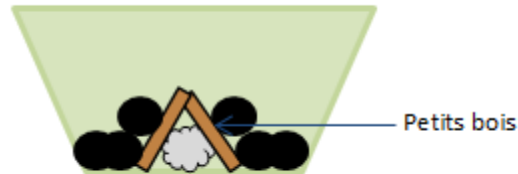


Figure X : Méthodes d'allumage avec du petit bois

#### d. Carton

Nous utilisons 40g de carton et deux feuilles de papier journal (l'une en guise de mèche).

On forme une boîte avec le carton que l'on remplit d'autres morceaux de carton et d'une feuille de journal.

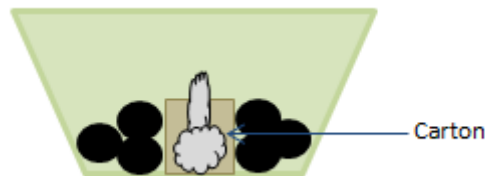


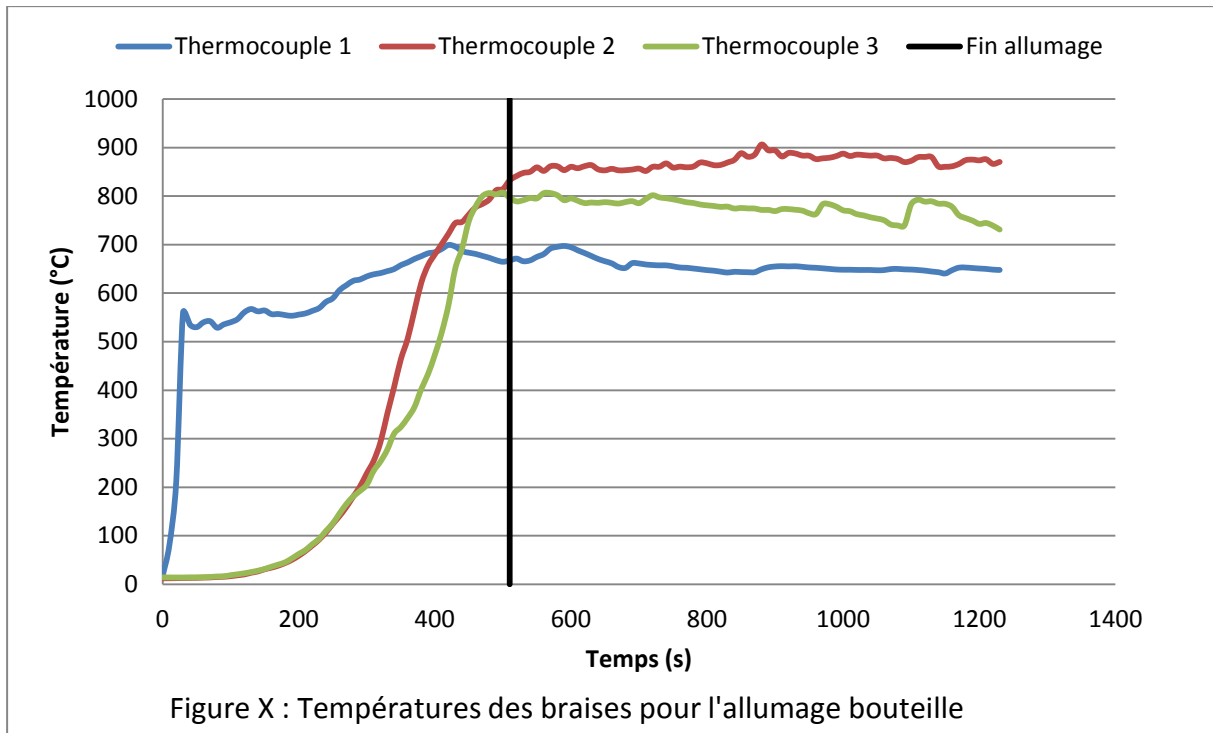
Figure X : Méthode d'allumage avec du carton

### Résultats

Nous éliminons directement la méthode « Tipi » avec le petit bois car celle-ci ne permet pas d'allumer le charbon.

#### a. Temps d'allumage

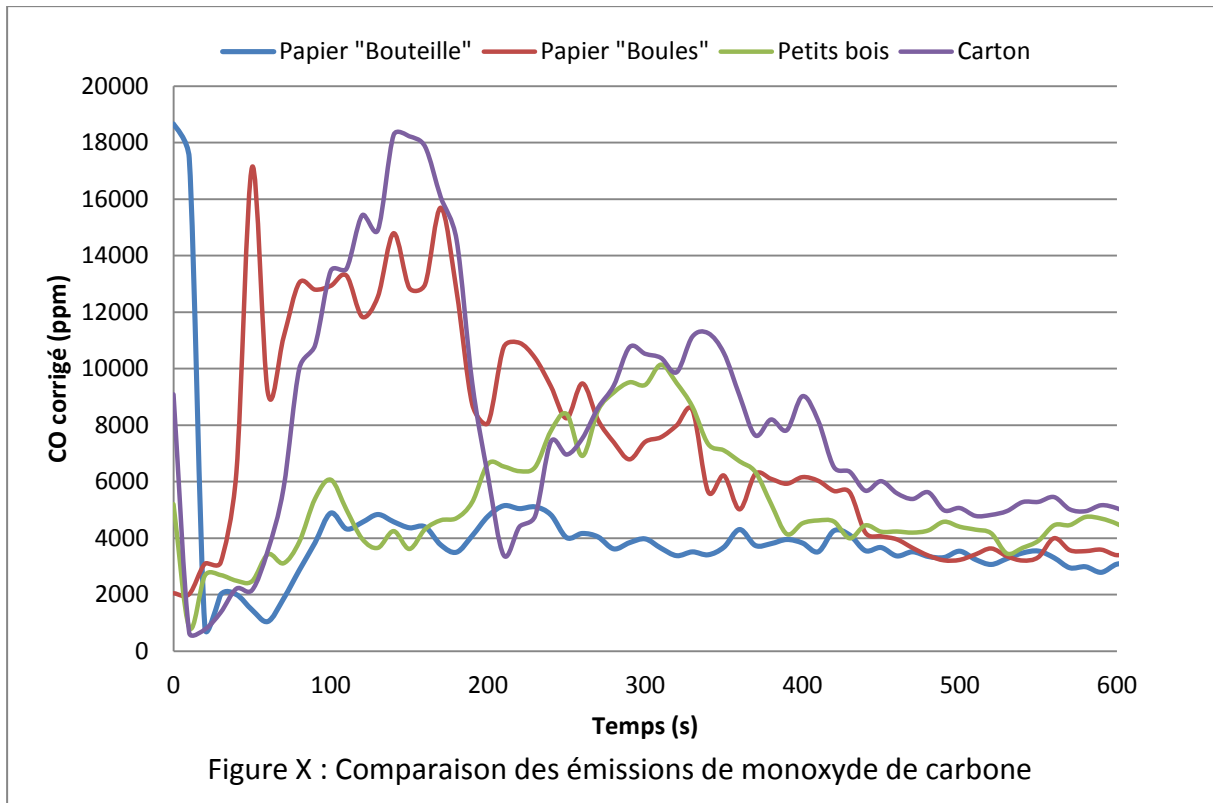
L'allumage correspond à la période de montée en température : nous considérons que l'allumage prend fin lorsque les trois températures se stabilisent. Pour déterminer le temps d'allumage, on étudie l'évolution des températures des différents allumages. Le temps d'allumage est relativement court et pour l'ensemble des tests il varie de 8 à 15 min. L'allumage le plus rapide est obtenu avec le papier journal et la méthode bouteille dont voici l'évolution des températures.



On constate pour certaines méthodes que les valeurs du thermocouple 1 sont plus faibles que celles des deux autres thermocouples en fin d'essai. Ceci est caractéristique de la méthode utilisée pour l'allumage : certains combustibles en se consumant laissent un espace où il n'y a pas de charbon, c'est le cas pour la méthode bouteille et le carton.

## b. Emission de monoxyde de carbone

Lors d'une combustion, l'allumage est généralement la phase la plus émettrice de monoxyde de carbone. On veut déterminer l'allumage le plus propre, pour cela on compare l'évolution du monoxyde de carbone des différentes méthodes.



On constate la présence de pics de CO lors des allumages : les plus élevés se produisent lors des allumages avec le papier journal et le carton car ces combustibles se composent de produits chimiques qui libèrent du CO. L'allumage avec le petit bois semble peu émetteur de monoxyde de carbone pourtant en comparant les quantités moyennes de CO de la figure, on constate qu'il émet un peu plus que l'allumage bouteille.

Combustible	Méthode	CO moyen (ppm)
Papier	Boules	7691
Papier	Bouteille	4242
Petits bois	Tour creuse	5001
Carton	Boite	6883

Figure X : Quantité moyenne de CO durant l'allumage

Nous décidons d'utiliser l'allumage bouteille pour le reste des expériences car il permet d'obtenir l'allumage le plus rapide et les émissions de CO les plus faibles sur l'ensemble de l'allumage. De plus, cette méthode est très facile à mettre en œuvre.

## 6. Test d'ébullition de l'eau

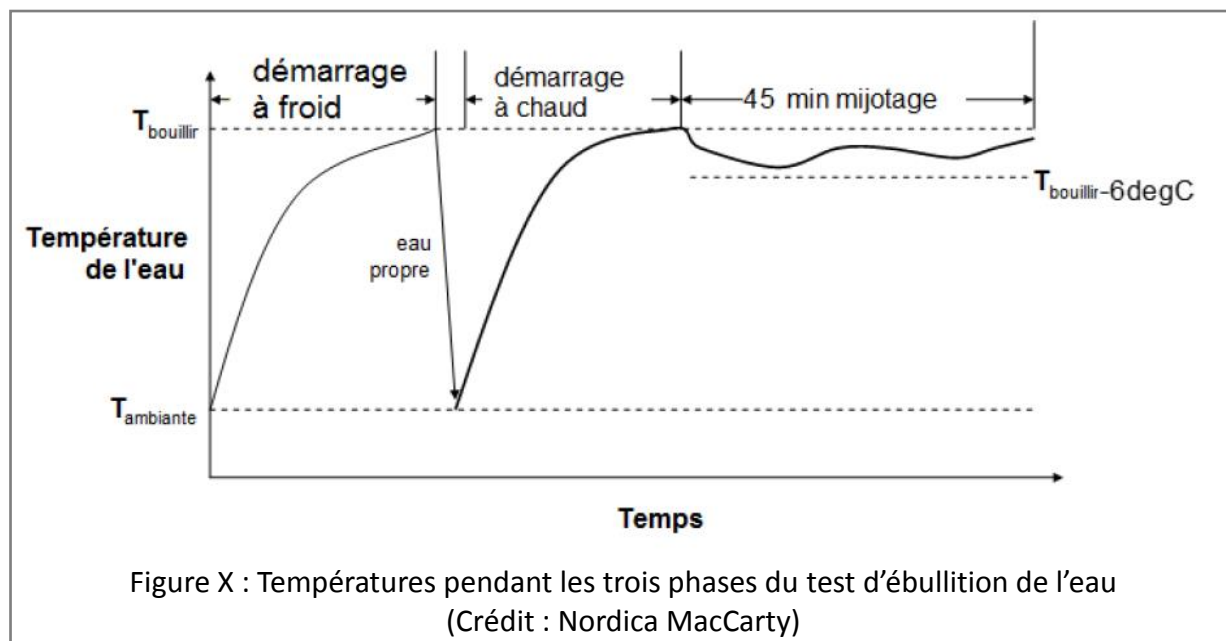
### Objectifs

Le test consiste à faire bouillir de l'eau afin d'effectuer le bilan énergétique du système et de connaître son rendement. Nous cherchons également à travers ce test à connaître la distribution des pertes associées au foyer lors de son utilisation. Il est également possible d'effectuer une étude des émissions de polluants en parallèle de l'étude énergétique.

Aucunes modifications ne sont apportées au foyer.

### Protocole

Le banc d'essai est utilisé dans sa totalité. Notre protocole s'inspire de celui établi par la fondation Global Alliance for Clean Cookstoves. Il se divise en trois parties illustrées ci-dessous :



**Phase de démarrage à froid :** Le foyer est à température ambiante. Il est chargé de 600 grammes de charbon de bois. La marmite est posée sur le trépied ce qui nous permet d'acquérir la masse d'eau indépendamment de la masse de combustible. Une quantité de 2.5L d'eau à température ambiante est versée dans la marmite, cette quantité est représentative de la quantité de liquide utilisée lors de l'élaboration d'un repas en Mauritanie.

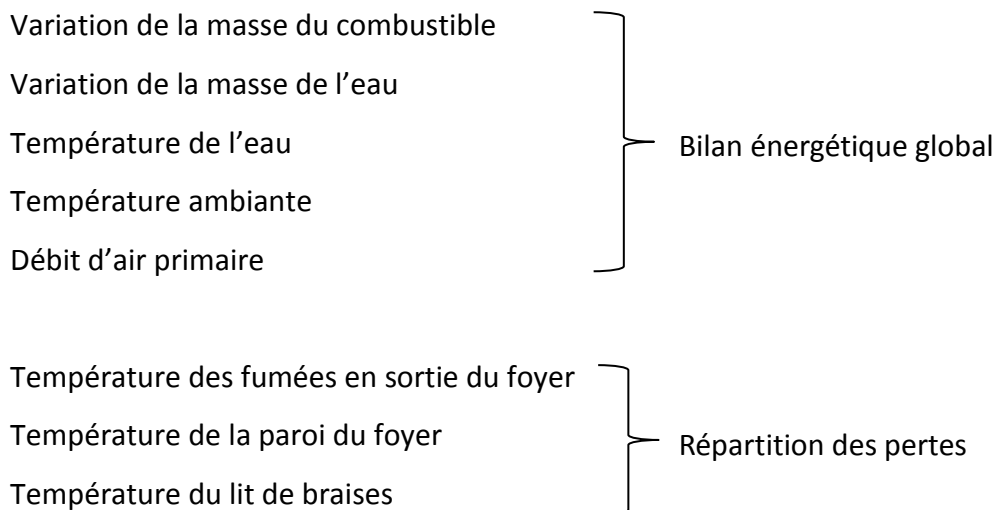
Nous procédons ensuite à l'allumage (technique de la « bouteille »). Cette phase prend fin quand la température de l'eau mesurée à l'aide d'un thermocouple, placé au centre de la marmite à une hauteur de 5 cm du fond, atteint le point d'ébullition locale.

**Phase de démarrage à chaud :** Cette phase est particulièrement utile pour caractériser l'utilisation d'un foyer dont l'inertie thermique est importante et dans lequel plusieurs plats sont préparés à la suite.

Le combustible et l'eau sont changés. Les quantités sont similaires à la phase précédente. L'eau est chauffée jusqu'au point d'ébullition.

**Phase de mijotage :** L'eau étant maintenant en ébullition, l'objectif est de la maintenir dans cet état pendant 45 minutes. Il ne faut pas descendre en dessous de 6 degrés sous le point d'ébullition local sinon l'essai se termine. Pour ce faire il est possible d'ajouter du combustible.

Pendant ses trois phases, les données suivantes font partie de l'acquisition :



Les trois dernières sondes de températures qui permettent le calcul de la répartition des pertes sont positionnées de la façon suivante :



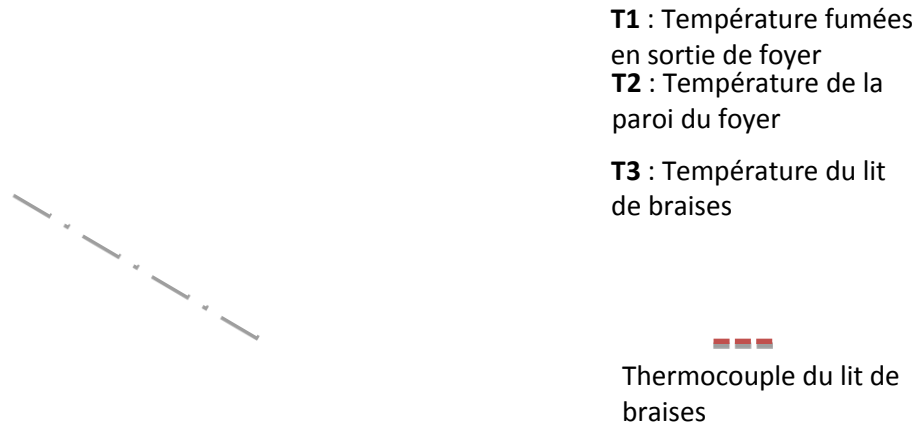


Figure X : Positions des thermocouples pour les calculs de pertes

### Résultats

Nous réalisons 4 tests d'ébullition. Les courbes représentant la température de l'eau en fonction du temps ressemblent à celle définie par le protocole. Cependant il arrive parfois lors de nos essais en fin de manipulation que la température de l'eau soit inférieure aux 6 degrés sous le point d'ébullition locale. Ceci veut dire que le combustible ne libère plus assez d'énergie pour maintenir l'eau en ébullition et que nos ajouts de charbon n'étaient pas suffisants. Dans ce cas, pour pouvoir les comparer entre-elles, les manipulations prennent quand même fin après 45 minutes de mijotage.

Nous choisissons donc de mesurer le temps d'ébullition à partir d'une certaine quantité de combustible (650 grammes) plutôt que de maintenir l'eau à ébullition dans la marmite et de mesurer la quantité de charbon injectée.

La figure suivante est un exemple de courbe obtenue, elle correspond au troisième test d'ébullition :

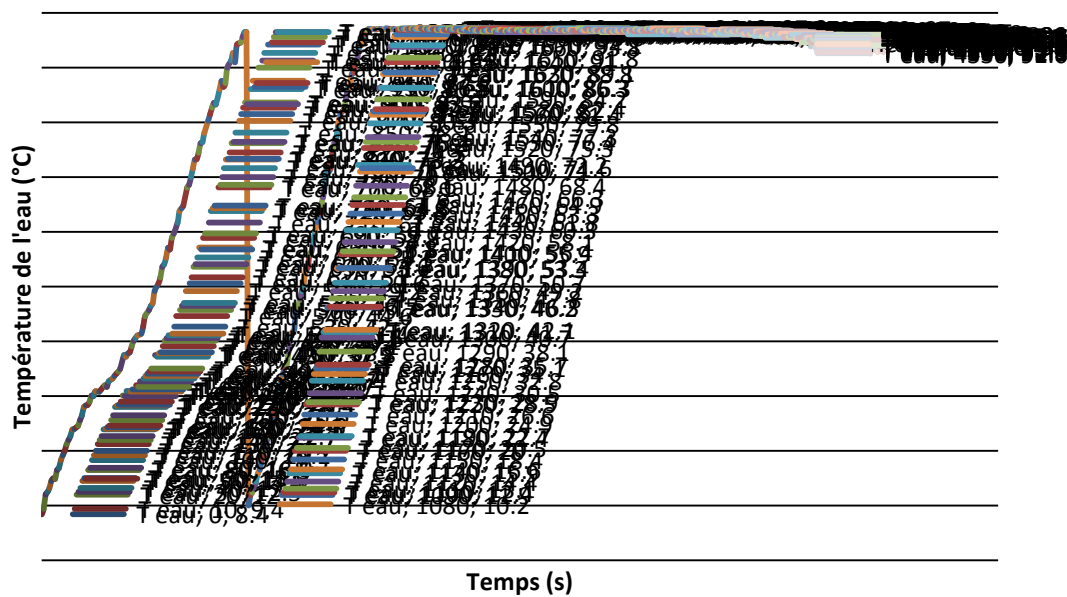


Figure X : Température de l'eau dans la marmite pendant le test d'ébullition 3

Le palier d'ébullition est observable. La température est dans des ordres de grandeurs correctes par rapport à la température d'ébullition dans les conditions de pression normales (100°C pour 1atm).

Ensuite, nous cherchons à déterminer le rendement du foyer de deux manières différentes que nous appellerons la méthode globale et la méthode avec quantification de la répartition des pertes.

### a. Méthode globale

La méthode consiste à comparer l'énergie reçue par l'eau par rapport à l'énergie libérée par le charbon de bois. C'est la méthode relative au bilan énergétique global (la distribution des pertes d'énergie n'est pas déterminée). Le rendement, ainsi calculé, englobe les pertes dues à la combustion, c'est-à-dire l'énergie dissipée par les fumées. Il prend aussi en compte les pertes liées aux équipements : le foyer et la marmite qui ne restituent pas complètement la chaleur à l'eau. Il est obtenu grâce à la formule suivante :

$$n = \frac{m_{\text{eau initiale}} * C_{p\text{eau}} * \Delta T + L_{\text{vap eau}} * m_{\text{eau vaporisée}}}{m_{\text{combustible consommé}} * PCI_h} * 100$$

$$n = \frac{m_{eau\ initiale} * Cp_{eau} * \Delta T + L_{vap\ eau} * (m_{eau\ initiale} - m_{eau\ finale})}{(m_{combustible\ initiale} - m_{combustible\ finale}) * PCI_h} * 100$$

Le rendement est tout d'abord calculé phase par phase, puis essai par essai. Le rendement global moyen sur les essais vaut 23%.

## b. Méthode avec quantification de la répartition des pertes

La deuxième méthode de calcul du rendement est celle qui comptabilise les pertes et les soustrait à l'énergie fournie par le combustible pour obtenir l'énergie finale fournie à l'eau. Cette méthode est particulièrement intéressante pour connaître la répartition des pertes thermiques et ainsi se concentrer sur les plus grosses déperditions lors des modifications permettant l'amélioration des performances du foyer.

Les pertes sont liées à trois phénomènes. Le premier est la convection naturelle de l'air due aux différences de températures entre les éléments chauds du banc d'essai et l'environnement extérieur plus froid. Le second correspond au rayonnement des corps dont les températures sont supérieures à 0°K. Et le troisième est la dissipation de la chaleur des fumées dans l'atmosphère extérieure. Notre modèle est le suivant :

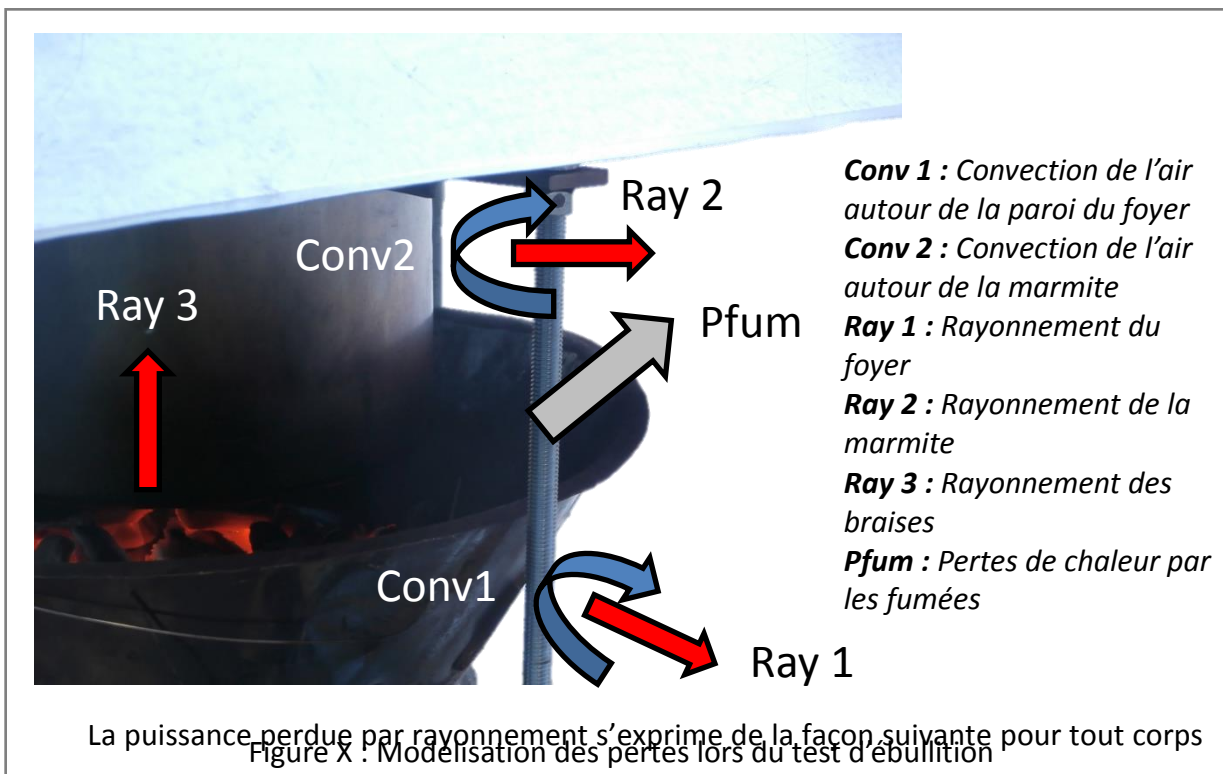


Figure X : Modélisation des pertes lors du test d'ébullition  
 placé à l'intérieur d'une enceinte dont les dimensions sont grandes par rapport à celui-ci :

$$P_{ray} = \varepsilon * \sigma * S * (T_{\text{émetteur}}^4 - T_{\text{extérieur}}^4) \text{ en Watts}$$

Avec  $\varepsilon$  = Emissivité du corps, nous choisissons  $\varepsilon = 1$  (corps noir),

$\sigma = 5.67 * 10^{-8}$  = Constante de Stephan Boltzman en  $W/m^2 \cdot K$ ,

Et  $S$  la surface de la zone émettrice en  $m^2$ .

La convection est naturelle. Pour connaître le coefficient de transfert convectif  $h$  il faut déterminer le type de régime du flux convectif pour en déduire le nombre de Nusselt  $Nu$ .

Coefficient de dilatation,  $\beta = 1/T$

Nombre de Grashof, 
$$Gr = \frac{\Delta T * \beta * D^3 * \rho^2 * g}{\mu^2}$$

Nombre de Prandtl, 
$$Pr = \frac{c_p * \mu}{\lambda}$$

Le produit  $Gr * Pr$  définit le type de régime, il est laminaire pour tous nos essais. Le nombre de Nusselt est donc :

$$Nu = 0.55 * (Gr * Pr)^{0.25}$$

A partir duquel on peut déterminer le coefficient  $h$  :

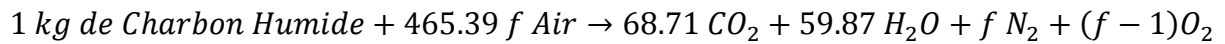
$$h = \frac{Nu * \lambda}{D}$$

Nous pouvons donc obtenir la puissance perdue par convection :

$$P_{conv} = S * h * (T_{\text{paroi}} - T_{\text{air extérieur}}) \text{ en Watts}$$

Avec  $S$  la surface de la paroi chaude en  $m^2$  et  $T_{\text{paroi}}$  sa température en Kelvin.

Les pertes par les fumées sont, quant à elles, calculées à partir du débit de fumées théorique que produit la combustion. Il est donc nécessaire d'écrire l'équation de la réaction pour en connaître les produits. Nous choisissons de l'écrire pour 1 kilogramme de charbon humide  $CH_{1.69}O_{0.03}$  :



Le volume de fumées humides théorique est donc :

$$V_{fh} = (\text{masse de charbon} * (n \text{ CO}_2 + n \text{ H}_2\text{O} + n \text{ N}_2 + n \text{ O}_2) * V_m) \text{ en Nm}^3$$

Avec  $V_m$  = Volume molaire d'un gaz parfait = 22.4 L/mol.

$$\text{Soit } V_{fh} = (\text{masse de charbon} * (68.71 + 59.87 + f + (f - 1) * 465.39) * 22.4 * 10^{-3})$$

Il est maintenant possible de calculer les pertes de chaleur dans les fumées :

$$P_{fumées} = V_{fh} * \rho * C_p * (T_{fumées} - T_{extérieure}) \text{ en Watts}$$

Le rendement global de l'installation vaut donc :

$$\text{Rendement} = \left( 1 - \left( \frac{\sum \text{Pertes}}{\text{Masse charbon} * PCI_h} \right) \right) * 100 \text{ en \%}$$

Cette méthode de calcul nous a permis de constater lors du calcul du facteur d'air que le flux de comburant ne circulait pas toujours dans le même sens. En effet, le facteur d'air est inférieur à 1, ce qui veut dire que parfois c'est l'air au-dessus du foyer qui alimente la combustion, le tirage est alors ascendant et les fumées sortent par l'arrivée d'air. Dans ce cas, ce n'est pas la combustion qui impose le tirage mais l'air injectée par la force du vent. En absence de vent, le tirage est montant.

Il est extrêmement difficile de contrôler la réaction de combustion dans ses conditions et le calcul du rendement et de la perte dans les fumées selon cette méthode sont faussés.

Cependant les calculs des pertes par rayonnement et convection restent justes, et la somme de celles-ci ne dépasse pas les 10%. Ce qui nous laisse à penser, d'après les résultats de rendement de la méthode globale, que les fumées causent les plus grosses déperditions thermiques.

Ainsi, afin de contrôler la réaction de combustion et le flux d'effluents gazeux, nous cherchons des solutions techniques pour forcer le tirage montant et le passage d'air par l'ouverture prévue à cet effet.

## 7. Test d'analyse du sens du flux gazeux

### *Objectifs*

Pour calculer le rendement à partir des pertes, nous avons besoin de connaître la quantité d'air amenée au système. Nous voulons déterminer si l'air apporté à la combustion provient de l'arrivée d'air ou non, ainsi on saura si les quantités d'air des tests précédents sont bonnes et permettent un calcul de rendement juste.

### *Protocole*

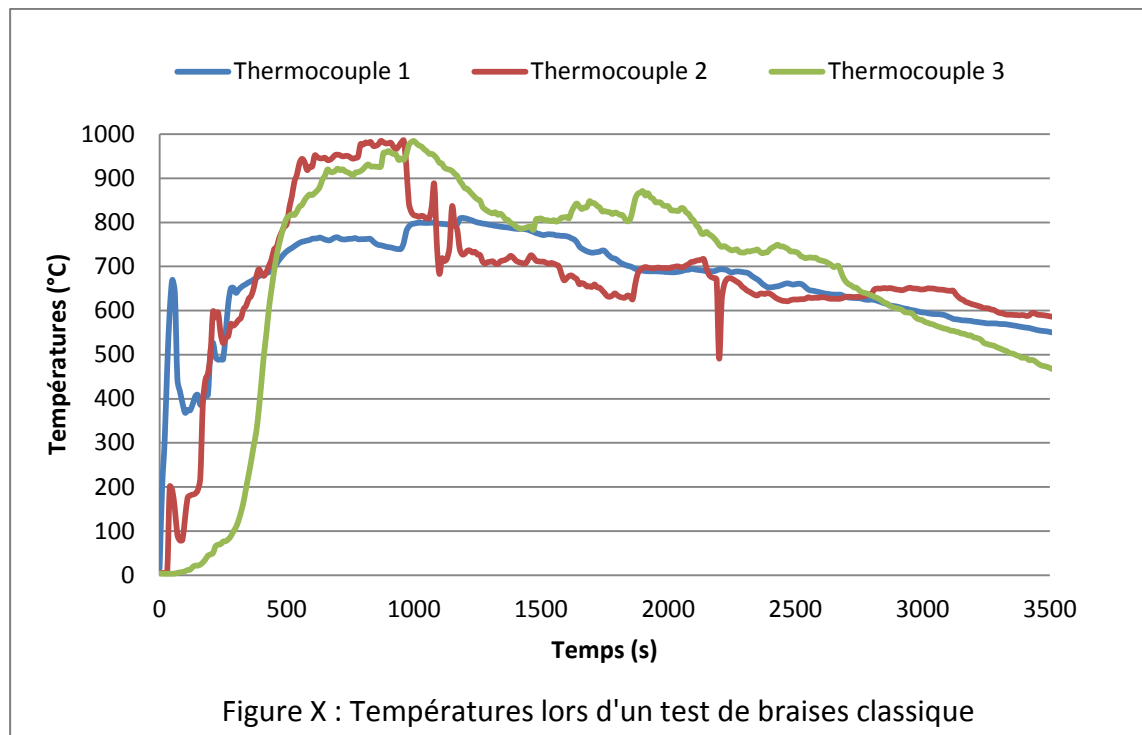
Nous décidons de réitérer le test des braises (cf protocoles test braises) en bouchant l'arrivée d'air. On veut observer les différences avec un test de braises classique pour déterminer si l'air provient de l'arrivée d'air. De plus, on déplace la buse du Testo que l'on place cette fois-ci 2cm au-dessus du lit de braises comme sur la figure X. Le Testo nous permet d'obtenir le pourcentage d'O<sub>2</sub> dans les fumées non diluées, si il est élevé cela signifiera que de l'air alimente la combustion en passant par le dessus du foyer.



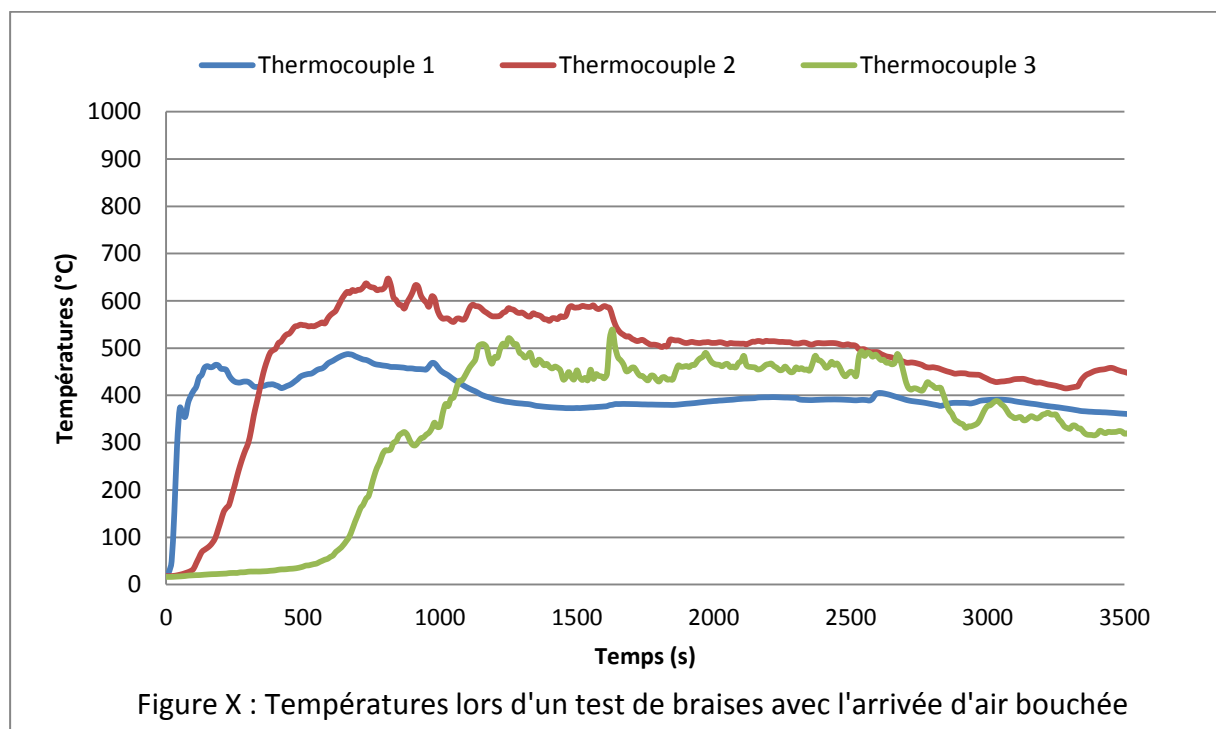
Figure X : Buse du Testo

## Résultats

On s'intéresse tout d'abord aux températures des braises.



Dans le premier test, après la phase d'allumage les températures prennent des valeurs dans une plage allant de 600 à 900 °C comme on le voit sur la figure X.



Lorsqu'on bouche l'arrivée d'air, on constate sur la figure X que les températures sont plus faibles : les valeurs après l'allumage s'étendent de 400 à 600°C. On peut déjà constater que

la combustion n'est pas la même. Pour comprendre plus en détails on s'intéresse aux valeurs ci-dessous :

	Masse charbon brulé (g)	Pourcentage de la masse brûlée (%)	Vitesse de combustion (g/h)
<b>Test braises 2</b>	489	81.5	494
<b>Test braises 3</b>	502	83.7	508
<b>Test braises air bouché 1</b>	297	49.5	300
<b>Test braises air bouché 2</b>	424	70.7	429

Figure X : Résultats relatifs au test de braises

On note que l'on brûle 10% de moins de combustible lorsque l'arrivée d'air est bouchée. De plus, les vitesses de combustion sont également inférieures. La combustion est plus lente quand on bouche l'arrivée d'air : cela indique que durant des essais classiques de l'air est apporté par l'arrivée d'air. Cet apport ne constitue pas la totalité de l'air dont a besoin la combustion. En effet, la teneur en oxygène des fumées situées à 2cm du lit de braise est de 19.2%, cela veut dire que de l'air alimente la combustion par le haut du foyer.

Afin de quantifier l'air qui entre tout de même par l'arrivée d'air, nous effectuons de nouveau un test de braises en remplaçant le matériel de mesure de vitesse de l'air. En effet, l'anémomètre à hélice utilisé précédemment mesure des vitesses pouvant aller jusqu'à 20m/s, cela signifie que l'on peut remettre en cause sa précision sur des valeurs inférieures à 2m/s. Or la vitesse de l'air mesuré est inférieure à 1m/s. Nous utilisons donc maintenant un anémomètre à fil chaud dont la plage de valeurs va de 0.1m/s à 1m/s.



Figure X : Anémomètre à fil chaud

Lors de ce test, la vitesse moyenne de l'air s'élève à 0.21m/s (finalement les valeurs restent relativement les mêmes que celles mesurées avec l'anémomètre à hélice). Nous remarquons que des fumées s'échappent de l'arrivée d'air. Afin, de visualiser les flux d'air qui entrent dans notre système, nous utilisons une machine à fumée.

Nous produisons de la fumée dans la même direction que l'arrivée d'air mais dans le sens contraire comme sur le schéma suivant :

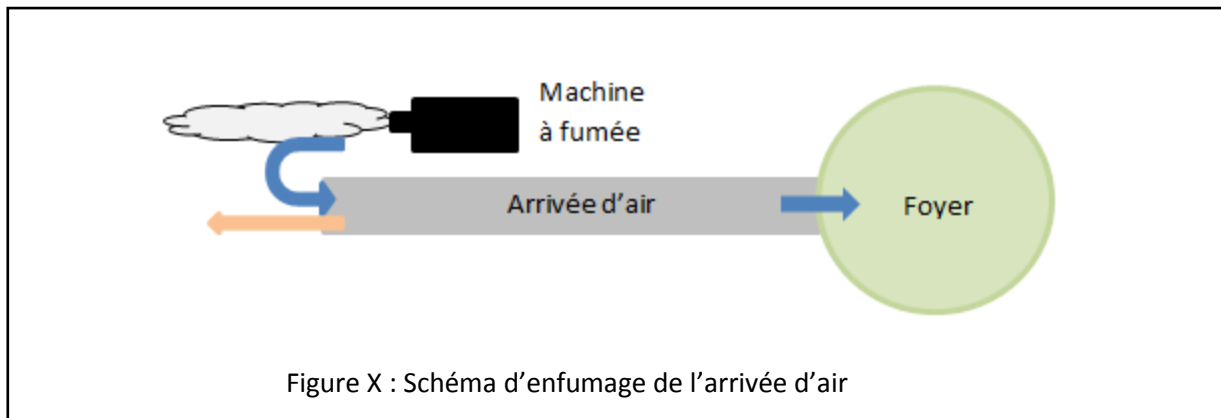
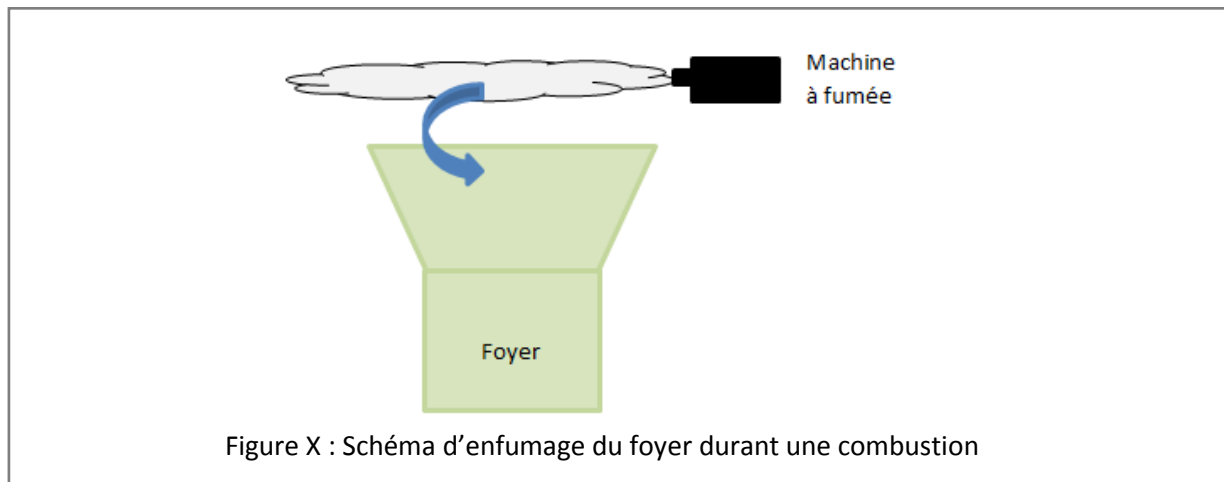


Figure X : Schéma d'enfumage de l'arrivée d'air

On constate avec cette expérience que la fumée entre bien par l'arrivée d'air et pénètre dans le foyer. Néanmoins, on observe également que par moment la fumée sort par l'arrivée d'air. Les vitesses mesurées avec l'anémomètre nous renseignent sur un mouvement d'air, mais nous ne pouvons pas savoir quand il s'agit d'une entrée d'air ou une sortie de fumées.

De même, nous utilisons la machine à fumée comme sur le schéma suivant pour visualiser les entrées d'air au-dessus du foyer :



La fumée est projetée au-dessus du foyer, nous observons qu'une partie de la fumée n'entre pas dans le foyer. De temps en temps la fumée vient taper le point chaud où se déroule la combustion. Ceci est cohérent avec la teneur en O<sub>2</sub> mesurée par le Testo.

Grâce à ces expériences, nous nous rendons compte que nous ne pouvons pas quantifier le volume d'air entrant dans le foyer. Il nous est donc impossible de calculer le rendement du foyer à l'aide des pertes.

## 8. Première modification du foyer

### *Objectifs*

Nous voulons limiter les pertes de charges dues à la plaque et forcer l'air à entrer par l'arrivée d'air. Ainsi nous voulons pouvoir contrôler le volume d'air entrant.

### *Solution*

Nous voulons remplacer la plaque percée par une grille. Le magasin de l'école ne disposant pas de grille ayant un maillage assez fin pour retenir le charbon, nous décidons d'en fabriquer une nous-même. Nous utilisons une grille possédant un grand maillage, nous découpons à l'aide d'une meuleuse deux disques du même diamètre que la plaque. Ensuite nous superposons les deux plaques pour obtenir le maillage souhaité, on soude enfin les deux disques ensemble pour obtenir la grille de la figure X.



Figure X : plaque originale et grille

### *Protocole*

Nous faisons un test d'ébullition classique (cf. protocole Test Ebullition).

### *Résultats*

Tout d'abord on constate que nous réussissons effectivement à augmenter le tirage. En effet, la vitesse moyenne de l'air entrant avec la grille est de 0.69m/s alors qu'elle était de 0.39m/s avec l'ancienne plaque. De plus, lors des essais nous remarquons qu'il n'y a plus de fumée qui sort par l'arrivée d'air. On constate tout de même que le tirage reste faible au début des phases de démarrage.

L'augmentation du débit d'air entrant a pour conséquence l'augmentation de la vitesse de combustion : elle passe de 594 à 642g/h. Le charbon est oxydé plus rapidement, on libère

donc plus d'énergie d'un seul coup ainsi on augmente la puissance du foyer. Cela est surtout notable lors de la phase de mijotage. En effet, le temps d'ébullition est de 23min lors des tests avec la grille et de 36min avec la plaque, enfin la puissance a augmenté de 0.44kW (soit une augmentation de 40%). On n'arrive pas à maintenir la température car nous consommons le charbon trop rapidement.

Afin d'améliorer la phase de mijotage, nous pensons qu'il faut ralentir la combustion. Pour cela nous voulons diminuer le débit d'air entrant.

## 9. Test d'optimisation du flux d'air entrant

### *Objectifs*

Nous voulons limiter le débit d'air entrant lors du mijotage afin de prolonger la durée d'ébullition de l'eau. Pour cela, nous voulons diminuer la section de l'arrivée d'air au démarrage de la phase de mijotage.

### *Solution*

Nous calculons l'énergie permettant le maintien en température de l'eau. A partir de cette valeur nous déterminons la quantité de charbon et le débit d'air nécessaire. Nous supposons que le tirage restera le même que celui des tests avec la grille, ainsi on détermine la section de l'arrivée d'air. Celle-ci doit être de  $22,9\text{cm}^2$  soit la moitié de la section habituelle.

### *Protocole*

Nous réalisons un test d'ébullition avec la grille, et lorsque la phase de mijotage démarre nous obstruons la moitié de l'arrivée d'air avec du scotch aluminium comme sur la figure X.

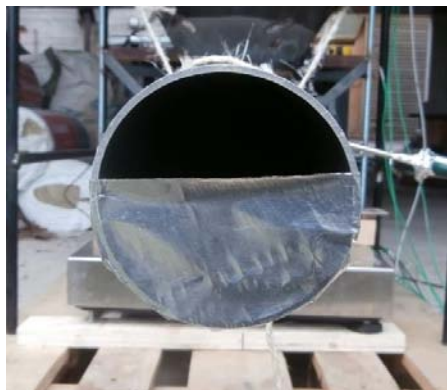


Figure X : Arrivée d'air pendant la phase de mijotage

### **Résultats**

Les résultats obtenus ne peuvent pas être comparés aux tests précédents. En effet, lors des tests avec la grille il n'y avait pas de vent contrairement au jour où nous faisons le test sur l'arrivée d'air. Or le vent a une influence importante sur la qualité du tirage. Lorsqu'il n'y a pas de vent, les mesures sont homogènes et le tirage important. Lorsqu'il y a du vent les mesures de la vitesse de l'air fluctuent beaucoup, ce qui indique que les fumées sortent par l'arrivée d'air temporairement.

On constate que pendant ce test la vitesse de l'air a nettement diminué lors des phases de démarrage, passant de 0.61m/s quand il n'y a pas de vent à 0.41m/s. Le débit d'air est moins important donc la combustion devrait être plus lente. Or la vitesse de combustion du charbon reste la même : avec et sans vent elle est autour de 970g/h pour les phases de démarrage et de 460g/h pour le mijotage. Cela veut dire que le vent alimente la combustion par le haut du foyer malgré la grille qui permet d'augmenter le tirage et forcer le passage par l'arrivée d'air. Pour améliorer le foyer, il est donc essentiel de limiter l'impact du vent sur la combustion.

On remarque tout de même que le tirage entre la phase de démarrage à chaud et le mijotage a diminué : nous limitons le débit d'air avec le scotch.

## 10. Deuxième modification du foyer

### *Objectifs*

Le remplacement de la plaque de rétention des braises par une grille améliore la qualité de la combustion de par la limitation des pertes de charges associées à l'air primaire. Celui-ci a plus de facilité à entretenir la combustion. Cependant le vent joue toujours un rôle déstabilisateur. Notre objectif est donc de limiter son impact.

### *Solutions*

Nous cherchons à utiliser le vent pour créer une dépression au-dessus du foyer et ainsi contribuer à l'évacuation des fumées. Cette fois-ci le flux sera dans le même que celles-ci et le tirage toujours montant.

Pour ce faire, nous réalisons une collerette en tôle acier galvanisée 6/10 (0.6mm). Elle est dimensionnée de telle sorte que le foyer puisse rester un cuiseur multi marmite. Le cintrage est réalisé à l'aide d'un marteau et d'un fer U. Il suffit de taper avec une des arrêtes du marteau sur les génératrices du cône pour cintrer la pièce. Une fois la collerette cintrée, elle est posée sur l'intérieur du foyer puis fixée avec des attaches en tôle elles-aussi. Le joint d'étanchéité est réalisé avec de la terre.



Figure X : Collerette en tôle avec joint en terre

### **Protocole**

Un test d'ébullition est réalisé. La section d'arrivée d'air est toujours réduite par deux lors de l'ébullition de l'eau.

### **Résultats**

Trois essais sont réalisés. Nous constatons une grande amélioration du comportement de la combustion vis-à-vis du vent malgré que celui-ci soit très présent. Deux comportements sont visibles et, dans tous les cas, les fumées sont concentrées vers la marmite et le vent ne pénètre plus le lit de braises.

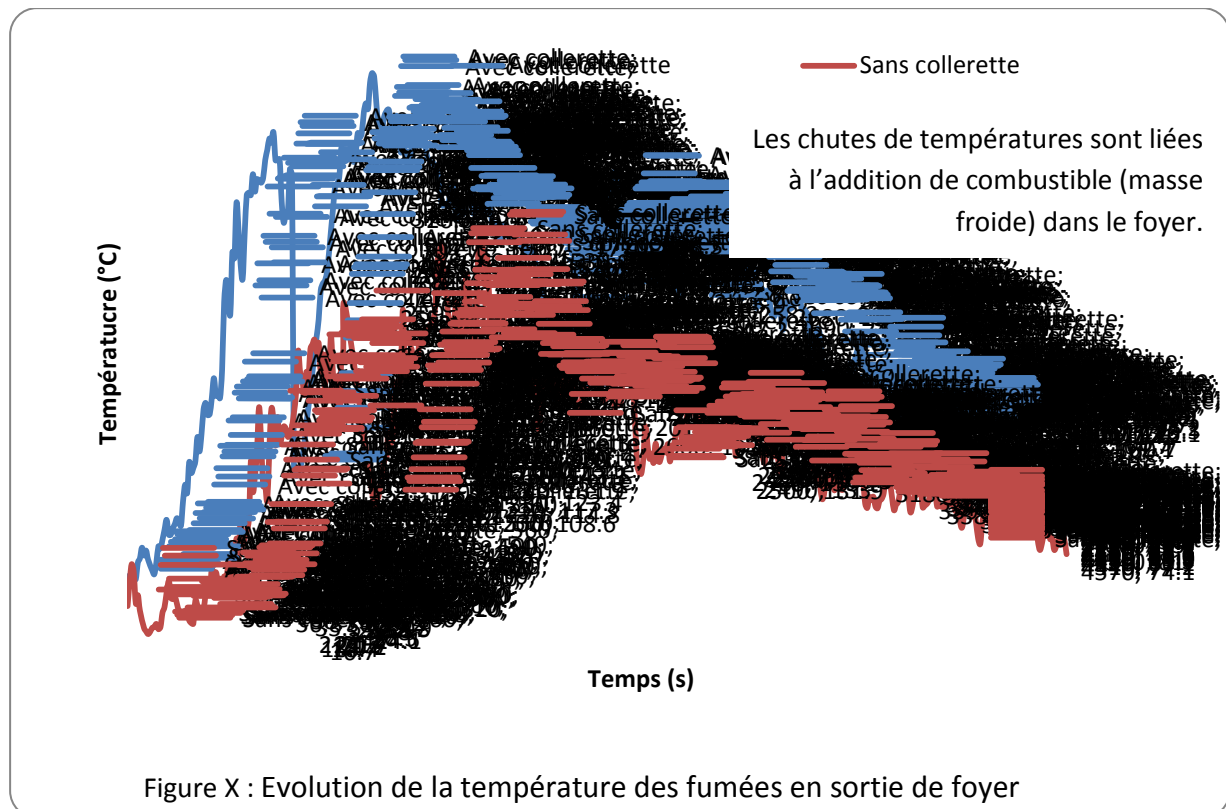


Figure X : Comportement du vent au niveau de la collerette

Sur l'image de gauche, le vent lèche la surface du joint de terre, de la collerette et de la marmite.

Sur l'image de droite, le vent cherche à pénétrer dans le foyer lorsque celui-ci n'est pas orienté par la collerette. La section de passage des fumées est réduite, elles sont donc plus concentrées et plus rapides. Cependant, Leur charge est suffisante pour compenser l'action du vent et le flux gazeux reste montant.

La collerette crée aussi un effet « four » à l'intérieur du foyer grâce au confinement qu'elle engendre. Cet effet a un impact sur la température des fumées en sortie de foyer, qui sont plus chaudes.



Les fumées étant plus chaudes, et le contact de celles-ci avec la marmite plus important, la vitesse d'ébullition de l'eau augmente. Cependant avec la grille et malgré la diminution de l'air entrant lors du mijotage, le temps d'ébullition reste plus court que lors de nos premiers essais sans modifications du foyer.

Malgré ce temps d'ébullition plus court, la masse d'eau évaporée est supérieure aux essais précédents, toutes phases confondues.

Le rendement augmente considérablement. Nous passons de 23% à 33%.

Nous en concluons que la collerette permet au foyer de gagner en efficacité. Cependant, couplée avec la grille, le temps d'ébullition reste trop court, il faut diminuer d'avantage le débit d'air lors de la période d'ébullition pour limiter la réaction sans pour autant atteindre un facteur d'air inférieur à 1.

Sachant que le charbon de typha se consume différemment du charbon de bois, nous décidons de commencer les tests avec celui-ci sans pour autant trouver la solution optimale de la gestion du débit d'air pour le charbon de bois.

## VI. Tests relatifs au charbon de typha

### 1. Tests d'ébullition sans modifications du foyer

#### *Objectif*

Nous voulons caractériser le foyer avec le typha afin de connaître les données de ce système.

#### *Protocole*

Nous effectuons un test d'ébullition classique sans modifications du foyer.

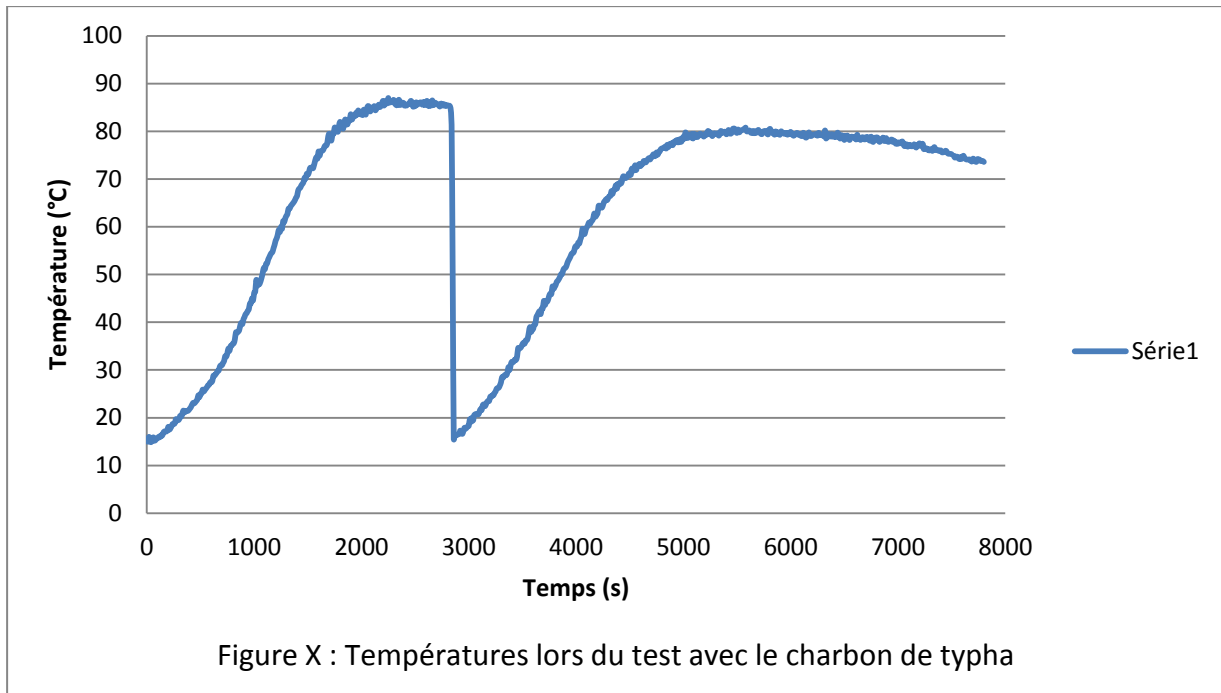
L'allumage est réalisé avec une méthode mélangeant la méthode bouteille et tipi. Avec deux feuilles de papier journal on forme un anneau de papier, on dépose le charbon de typha autour et on ajoute du petit bois contre le journal en formant un tipi, voir figure X. On utilise une troisième feuille de journal en guise de mèche.



Figure X : allumage typha

#### *Résultats*

Nous constatons premièrement que nous n'arrivons pas à faire bouillir l'eau : lors du test la température augmente jusqu'aux alentours de 80°C puis stagne :



Les phases de démarrage sont beaucoup plus longues que celles avec du charbon de bois : pour arriver à la même température, il faut 14min avec du charbon de bois et 40min avec du charbon de typha.

La puissance apportée à l'eau n'est pas suffisante : pour les phases de démarrages elle est de 0.62kW et pour le mijotage de 0.44kW. Or on a calculé précédemment qu'il faut respectivement une puissance de 1.4kW et 0.96kW.

Nous constatons que le facteur d'air est déjà élevé et égale à 2,7. Néanmoins, nous pensons qu'il faut encore augmenter le débit d'air entrant. En effet, pour calculer le facteur d'air nous utilisons l'équation de combustion du charbon de typha et nous déterminons une quantité d'air à fournir pour une combustion dans le cas idéal. Or cette quantité est plus petite pour le charbon de typha par rapport au charbon de bois. Ce calcul prend en compte la composition chimique du combustible mais pas ses caractéristiques physiques. Dans la pratique, nous remarquons que le typha est beaucoup moins poreux que le charbon de bois. Il est plus difficile pour l'air de rentrer en contact avec les molécules carbonées. C'est pourquoi nous pensons qu'il faut plus d'air que ce qui est préconisé par les calculs théoriques pour brûler correctement le charbon de typha. Et nous voulons encore augmenter le débit d'air entrant afin de faciliter la rencontre entre les atomes.

Pour ce test on obtient un rendement de 40%, ceci signifie que l'eau capte une grande partie de l'énergie libérée par le charbon de typha. L'énergie est émise de façon plus concentrée (lit de braises moins étendu, concentré sous la marmite), ce qui explique qu'il y ait moins de

pertes dans les fumées et d'énergie transmise au foyer. Néanmoins cette énergie est trop faible et il faut nuancer ce rendement avec la valeur de la puissance qui est trop faible.

## **2. Tests d'ébullition avec les modifications : Grille et collerette.**

### ***Objectif***

Nous voulons apporter les modifications nécessaires au foyer afin d'atteindre le point d'ébullition et de réduire les phases de démarrage.

### ***Solutions***

Afin d'augmenter le débit d'air on remplace la plaque par la grille. Pour atteindre le point d'ébullition nous utilisons de nouveau la collerette afin de créer un effet four qui limite la perte par les fumées en utilisant la chaleur de celles-ci pour chauffer la marmite.

### ***Protocole***

Nous faisons un test d'ébullition avec les améliorations suivantes sur le foyer : utilisation de la grille et de la collerette. Nous ne bouchons pas l'arrivée d'air lors du mijotage car il n'est pas nécessaire de ralentir la réaction lors du mijotage avec le charbon de typha.

### ***Résultats***

Nous remarquons que nous n'arrivons pas à faire bouillir l'eau : la température stagne toujours autour de 80°C. Pourtant nous réussissons à augmenter la température de l'air autour de la marmite : on passe de 77°C à 122°C. Ceci permet de limiter les pertes par les fumées, en effet le rendement augmente de 5% et atteint les 45%.

La puissance durant l'allumage a diminué, elle est de 0.58kW (0.76kW sans les améliorations). En utilisant la collerette nous limitons l'impact du vent. Or celui-ci amenait le débit d'air supplémentaire permettant une combustion plus importante du charbon. Pour augmenter la puissance, il faut augmenter le débit d'air entrant au niveau de l'arrivée d'air.

### 3. Augmentation de la section d'arrivée d'air

#### *Objectif*

Le but de la manipulation est d'accélérer la vitesse de combustion du charbon de typha pour obtenir une puissance plus importante.

#### *Solution*

Nous décidons d'ouvrir au maximum la base du foyer afin d'avoir une section d'arrivée d'air la plus grande possible.

Trois autres ouvertures similaires à celle d'origine sont réalisées dans le foyer.

#### *Protocole*

Un test d'ébullition est réalisé.



Figure X : Collerette en tôle avec joint en terre

### ***Résultats***

La combustion est peu satisfaisante, on ne constate pas d'augmentation de vitesse de combustion. L'eau prend plus de temps à chauffer et la température du lit de braises est plus faible que pour les autres essais.

La puissance du foyer est donc diminuée. Ceci est sûrement dû au surplus d'air froid que l'on injecte dans le système qui perturbe et ralentit la réaction.

De plus lorsqu'il y a beaucoup de vent, celui-ci passe par un orifice et sort par celui d'en face, en créant une dépression qui induit un tirage descendant. Les pertes par fumées sont donc augmentées.

## **VII. Conclusion**

Le charbon de typha possède des caractéristiques différentes de celles du charbon de bois, ce qui entraîne une combustion différente. Les améliorations du foyer apportées par l'étude avec le charbon de bois permettent également d'obtenir une meilleure combustion du charbon de typha, même si les effets sont moins importants. Nous avons observé des améliorations lors de l'utilisation de la grille et de la collerette. Néanmoins, les performances d'un foyer dépendent du combustible utilisé, il doit donc être conçu pour un combustible précis. C'est pourquoi il est nécessaire de continuer les études relatives à l'augmentation des performances de celui-ci en utilisant uniquement du charbon de typha. Nous pensons que l'axe d'amélioration suivant devrait concerner la quantité d'air à injecter pour optimiser la combustion.

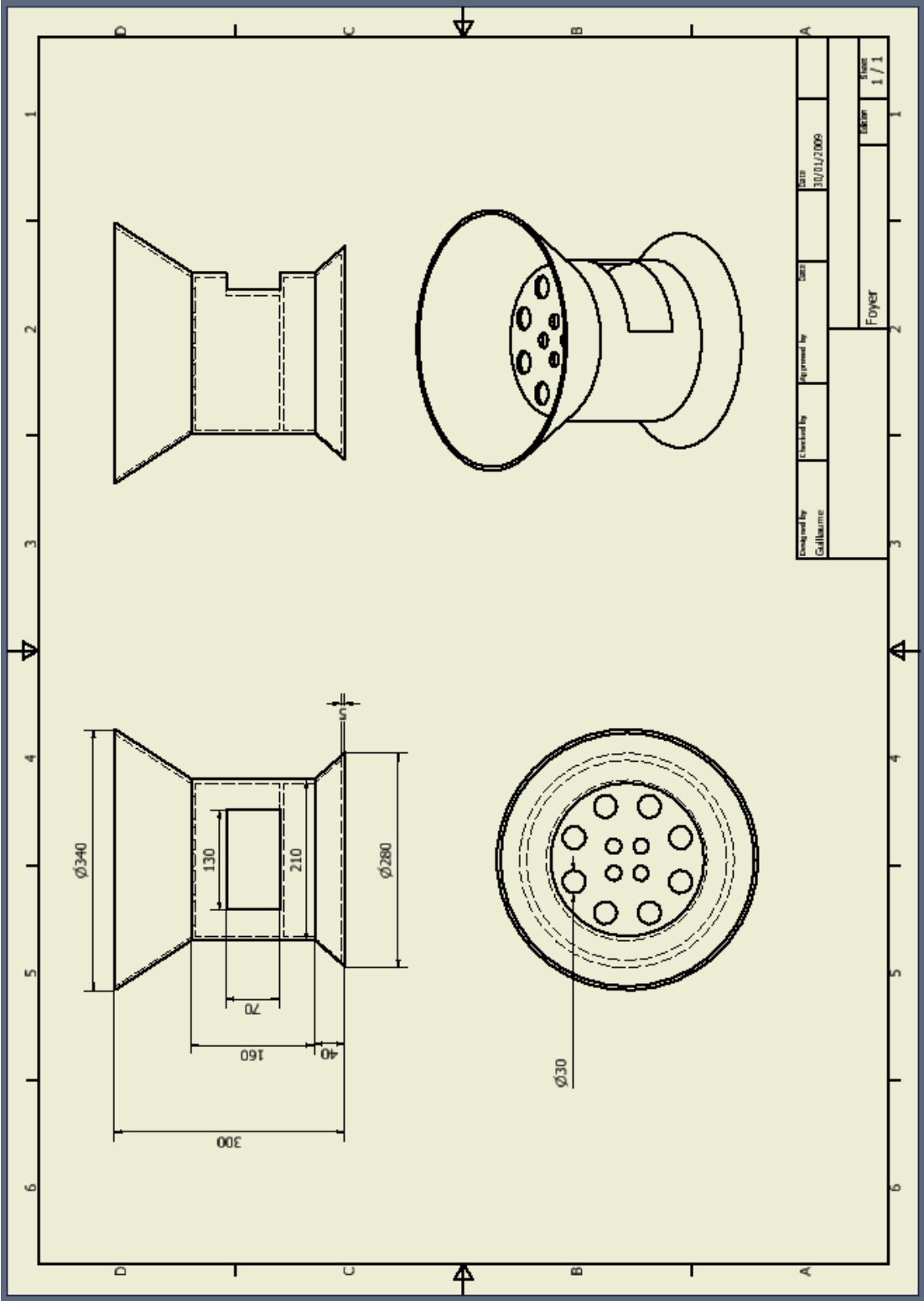
## VIII. Bibliographie

- (1) FAO. *Fao* [en ligne] Disponible sur : [http://www.fao.org/ag/\\_/agp/agpc/doc/\\_/counprof/Mauritania/mauritaniaFR.htm](http://www.fao.org/ag/_/agp/agpc/doc/_/counprof/Mauritania/mauritaniaFR.htm) [consulté le 01/02/2016]
- (2) FAO. *Fao* [en ligne] Disponible sur : <http://faostat3.fao.org/browse/area/136/E> [consulté le 01/02/2016]
- (3) FAO. *Fao* [en ligne] Disponible sur : <http://faostat3.fao.org/browse/area/136/E> [consulté le 01/02/2016]
- (4) FAO. *Fao* [en ligne] Disponible sur : <http://www.fao.org/docrep/004/x6812f/X6812F06.htm> [consulté le 01/02/2016]
- (5) MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE DE LA REPUBLIQUE DU SENEGAL. *Capitalisation des résultats de recherches et expériences sur le typha*. Juillet 2014
- (6) ORGANISATION POUR LA MISE EN VALEUR DU FLEUVE SENEGAL. *Omvs* [en ligne] Disponible sur : [http://www.portail-omvs.org/infrastructure-regionale/barrages/\\_barrage-diama](http://www.portail-omvs.org/infrastructure-regionale/barrages/_barrage-diama) [consulté le 01/02/2016]
- (7) WESTHOFF Beatrix, GERMANN Dorsi. *Foyers en Images*\_des éditeurs. Edition française, Frankfurt am Main 1995, ISBN 3-86099-135-3

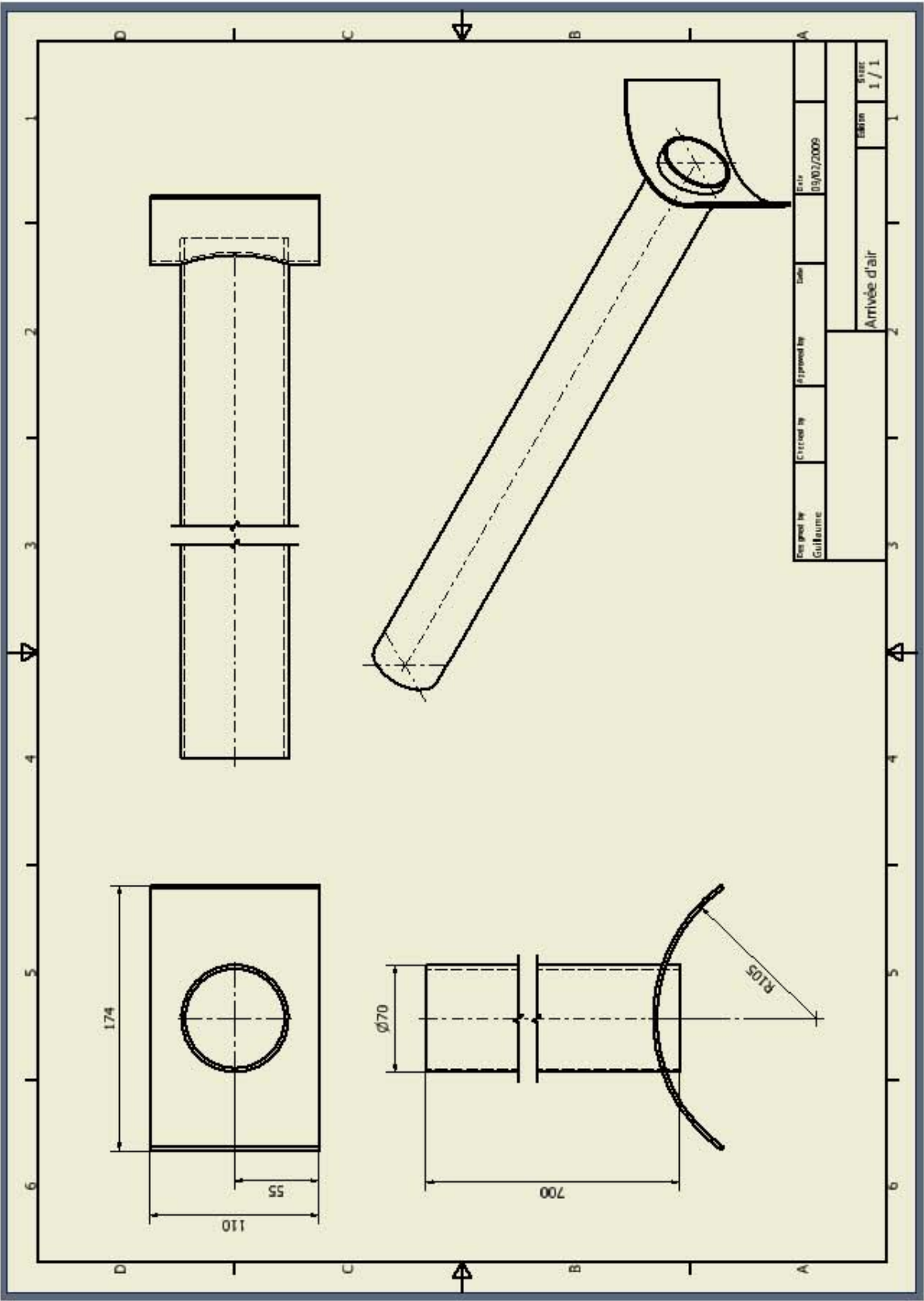
IX. Annexes

Annexe 1 : Définition du banc d’essai

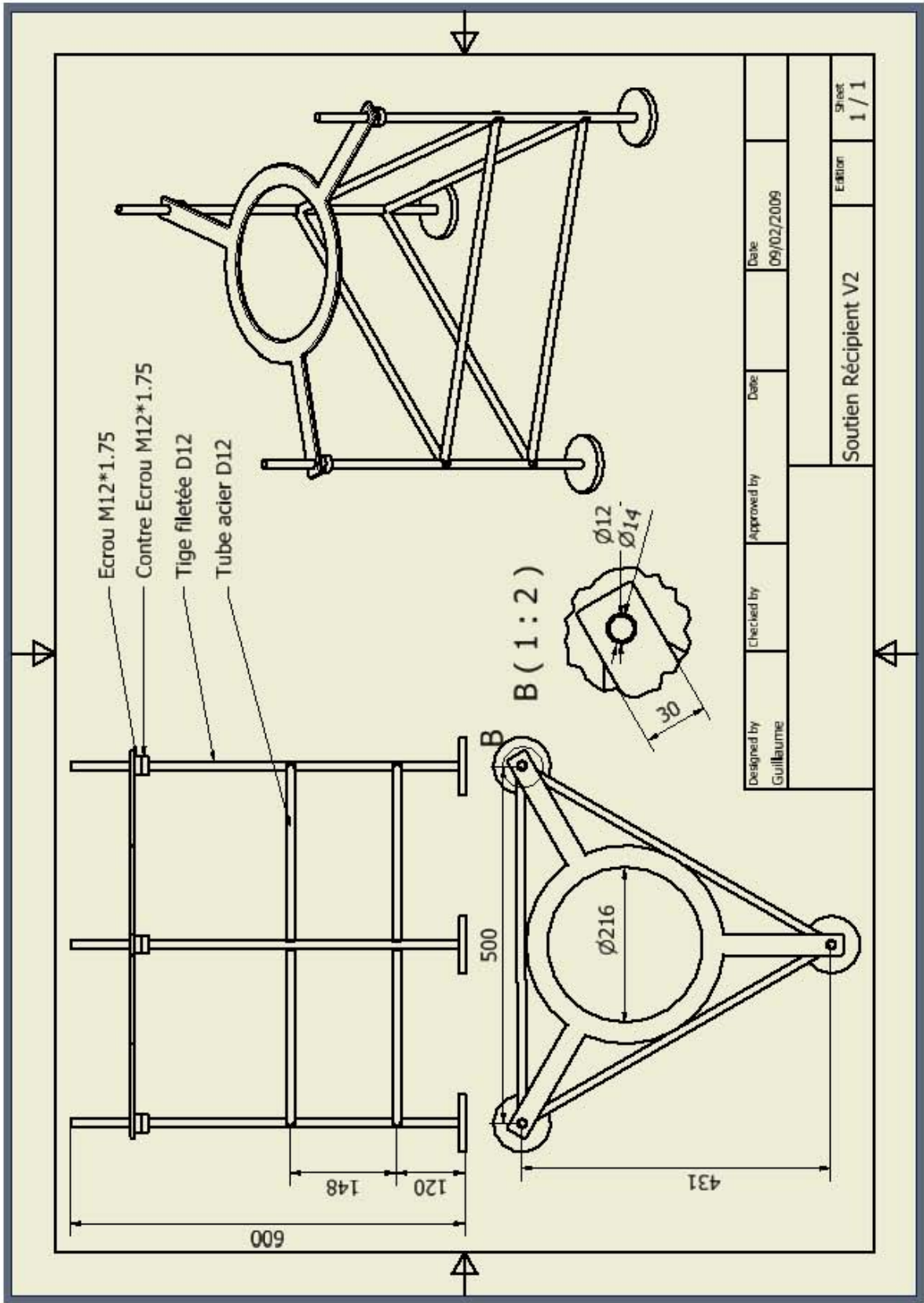
Plan du foyer



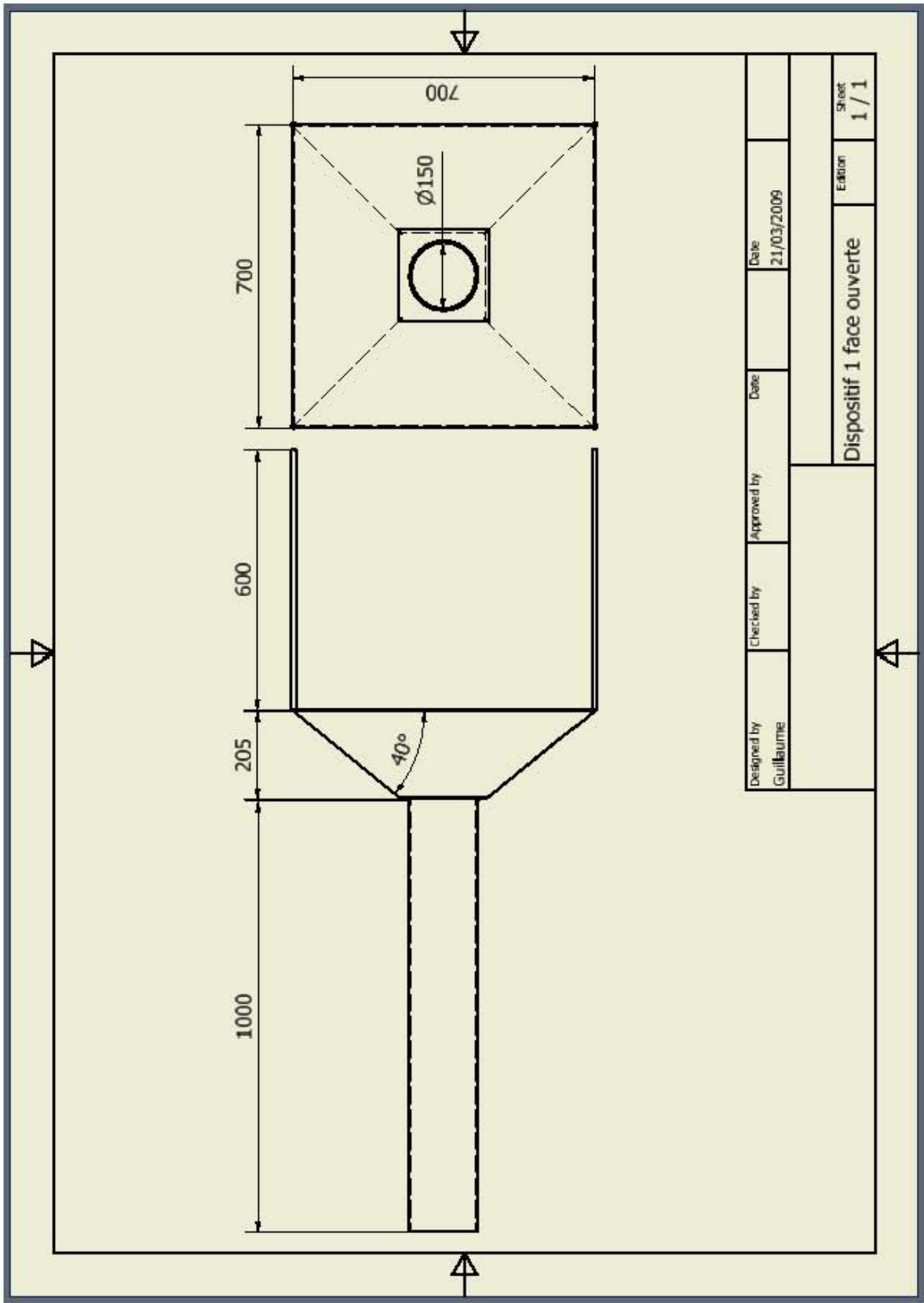
Plan du manchon de l'arrivée d'air



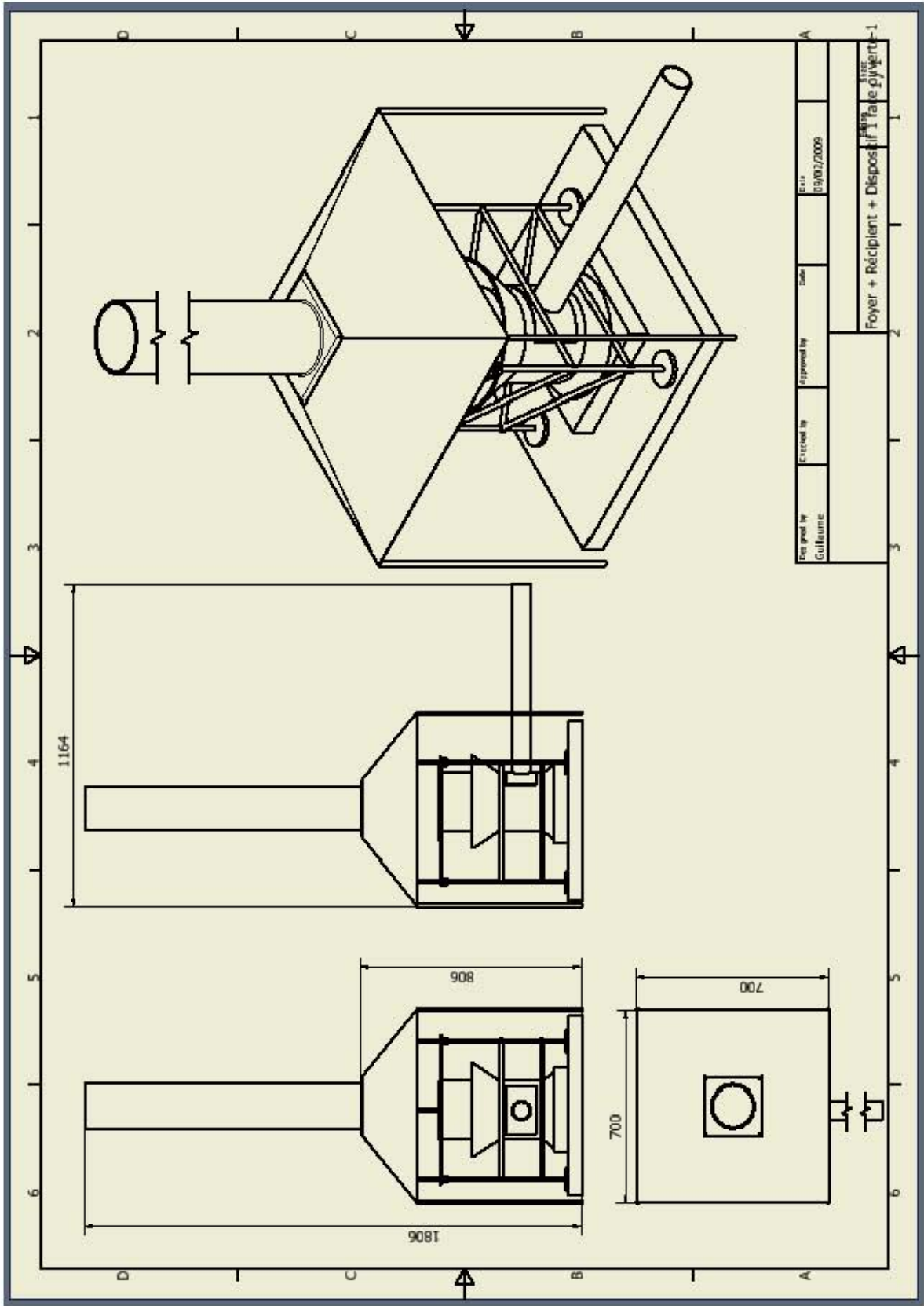
Plan du trépied



Plan de la hotte



Plan de l'ensemble du banc



## **Annexe 2 : Caractérisation du combustible**

### Humidité

	Echantillon		
	1	2	3
Masse initiale (g)	192.86	120.81	184.16
Masse finale (g)	186.52	118.13	179.92
<b>Humidité (%)</b>	<b>3.3</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>

### Taux de cendres

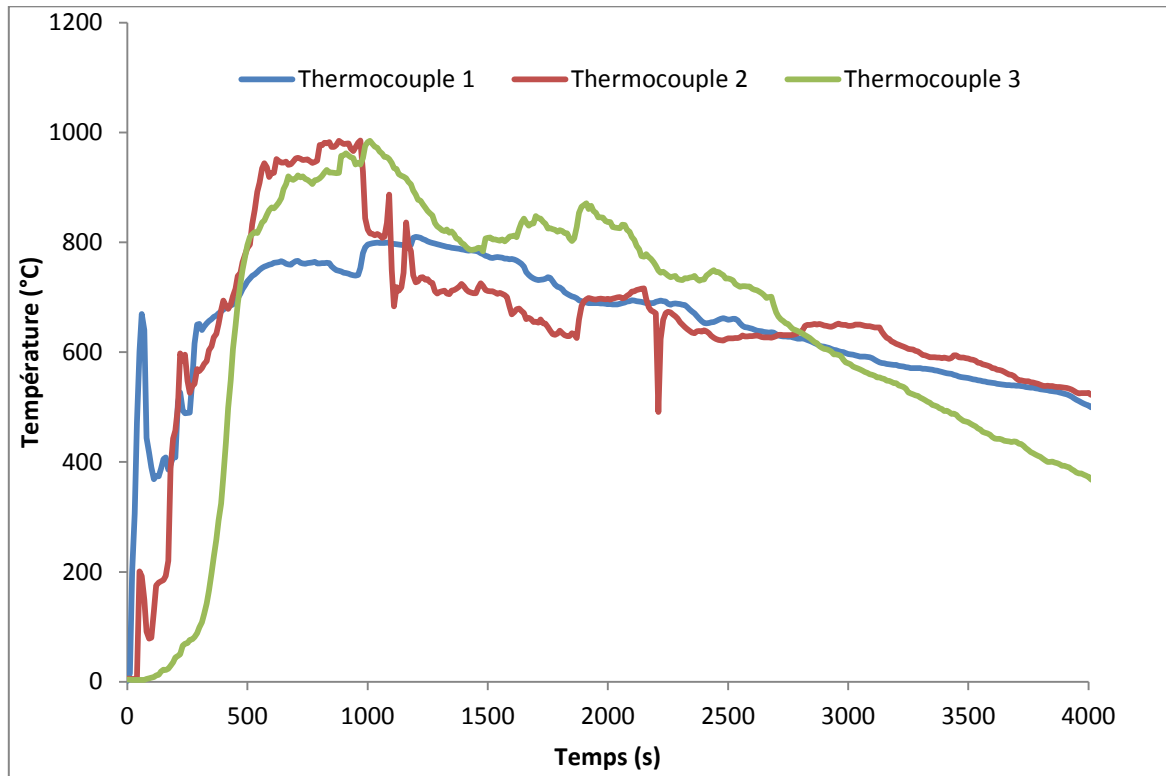
Masse (g)	Echantillon		
	1	2	3
Creuset	149.30	149.70	147.70
Creuset et échantillon anhydre	265.95	269.21	264.43
Creuset et cendres	227.90	214.40	224.10
Echantillon anhydre	116.65	119.51	116.73
Cendres	38.05	54.81	40.33
<b>Taux de cendres (%)</b>	<b>33</b>	<b>46</b>	<b>35</b>

### Pouvoir calorifique supérieur

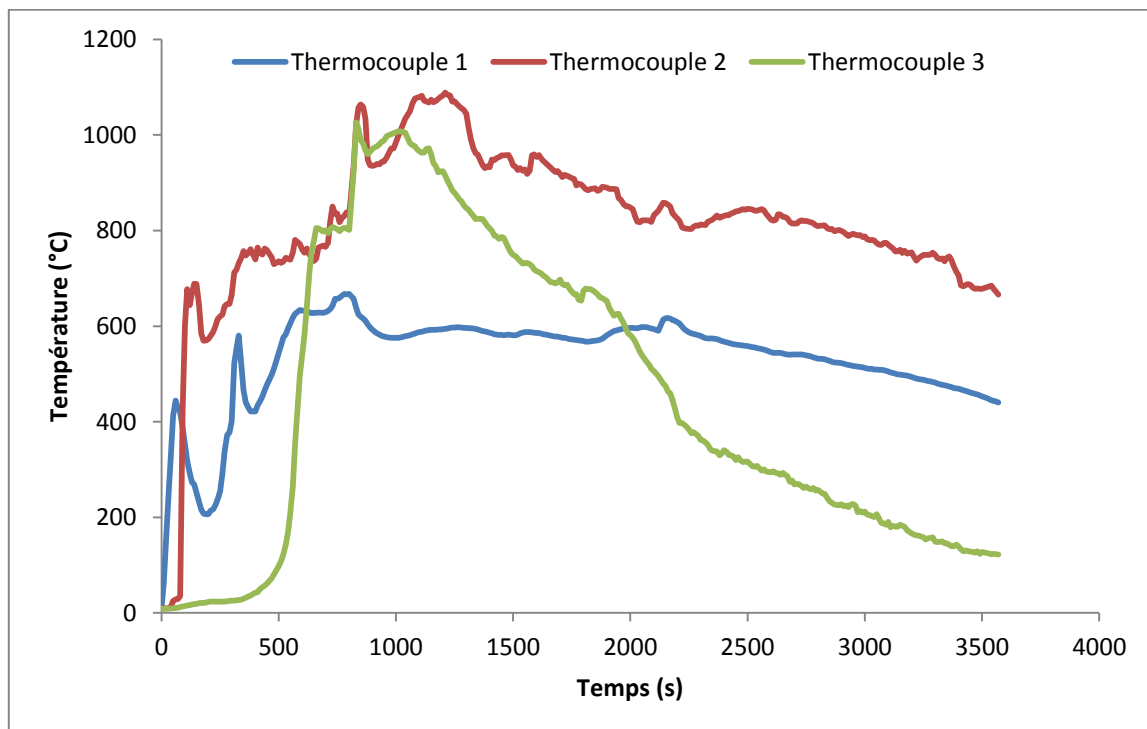
Echantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PCS (kJ/kg)	22137	19790	17596	19019	20227	18195	18545	21597	19621	19328
Echantillon	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
PCS (kJ/kg)	19521	22172	21236	19528	18990	19195	19331	18788	18766	

### Annexe 3 : Tests des braises

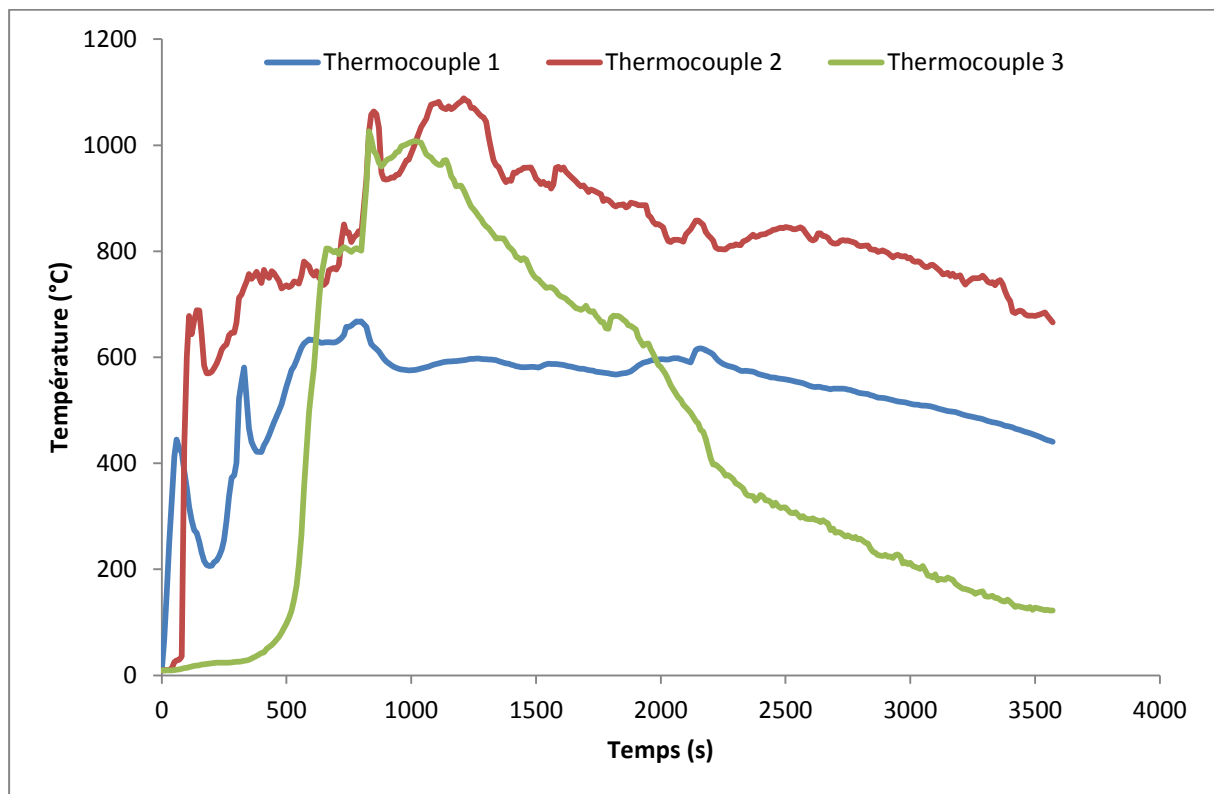
#### Test 1 : Répartition des températures dans le lit de braises



#### Test 2 : Répartition des températures dans le lit de braises

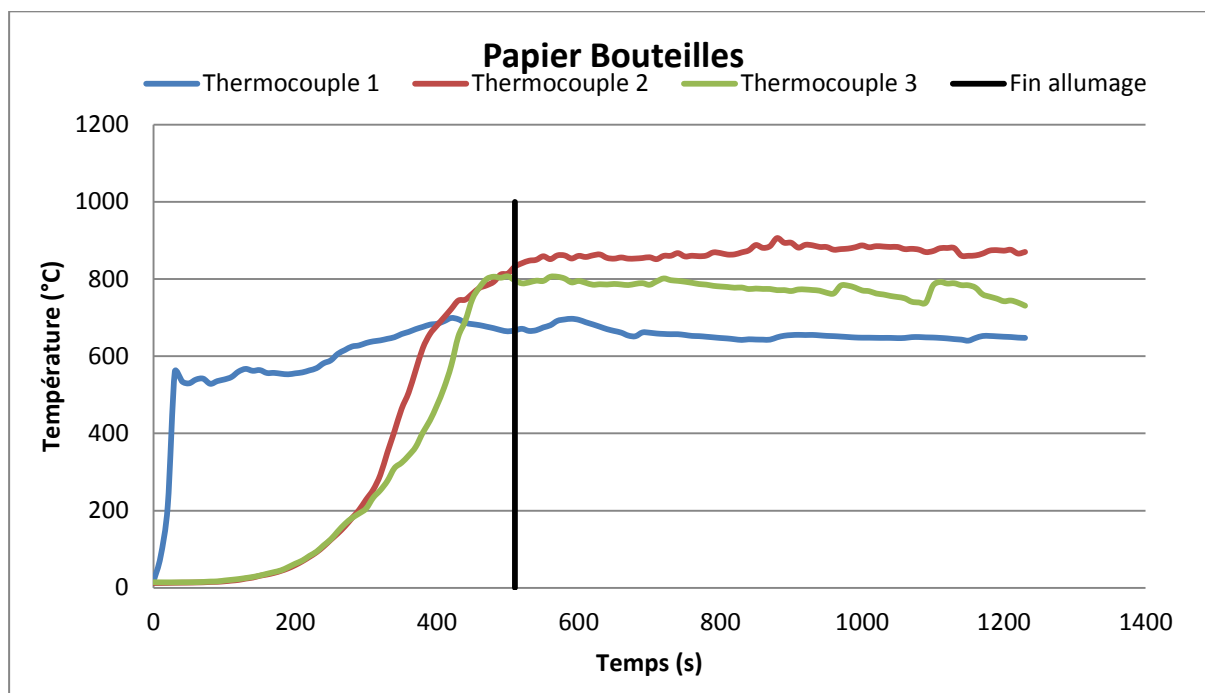


## Test 3 : Répartition des températures dans le lit de braises

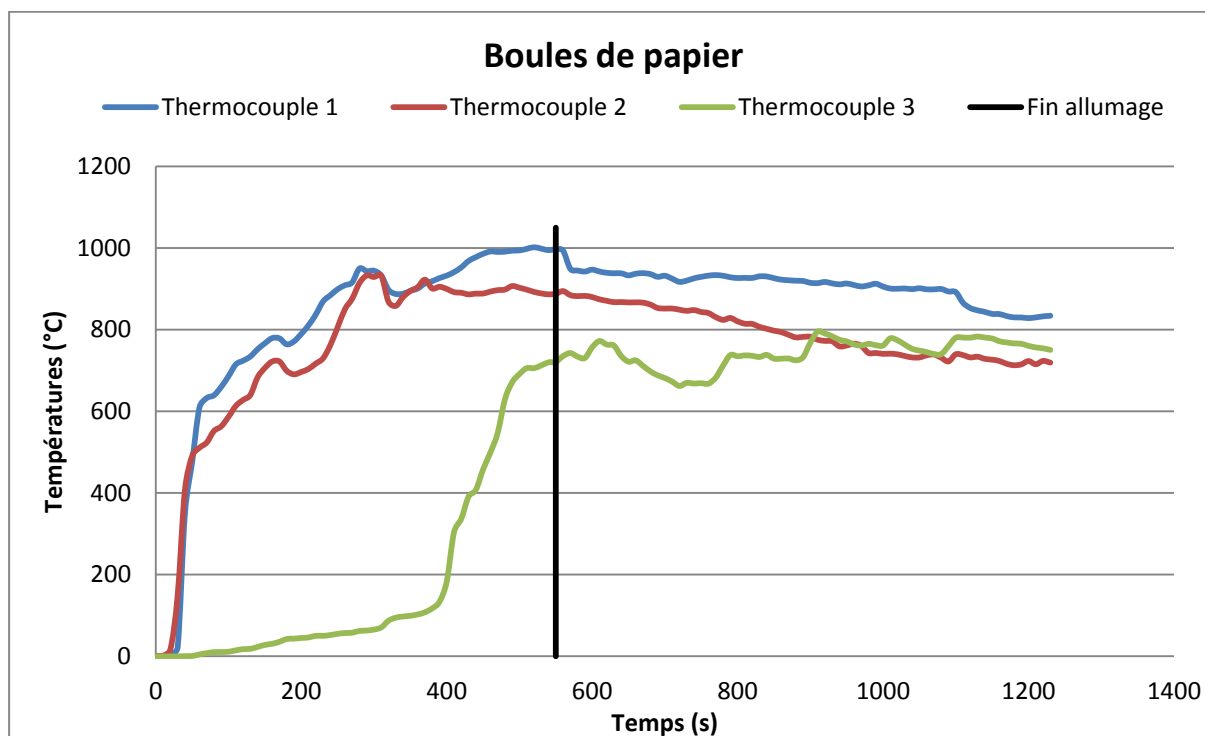


### Annexe 3 : Tests d'allumage

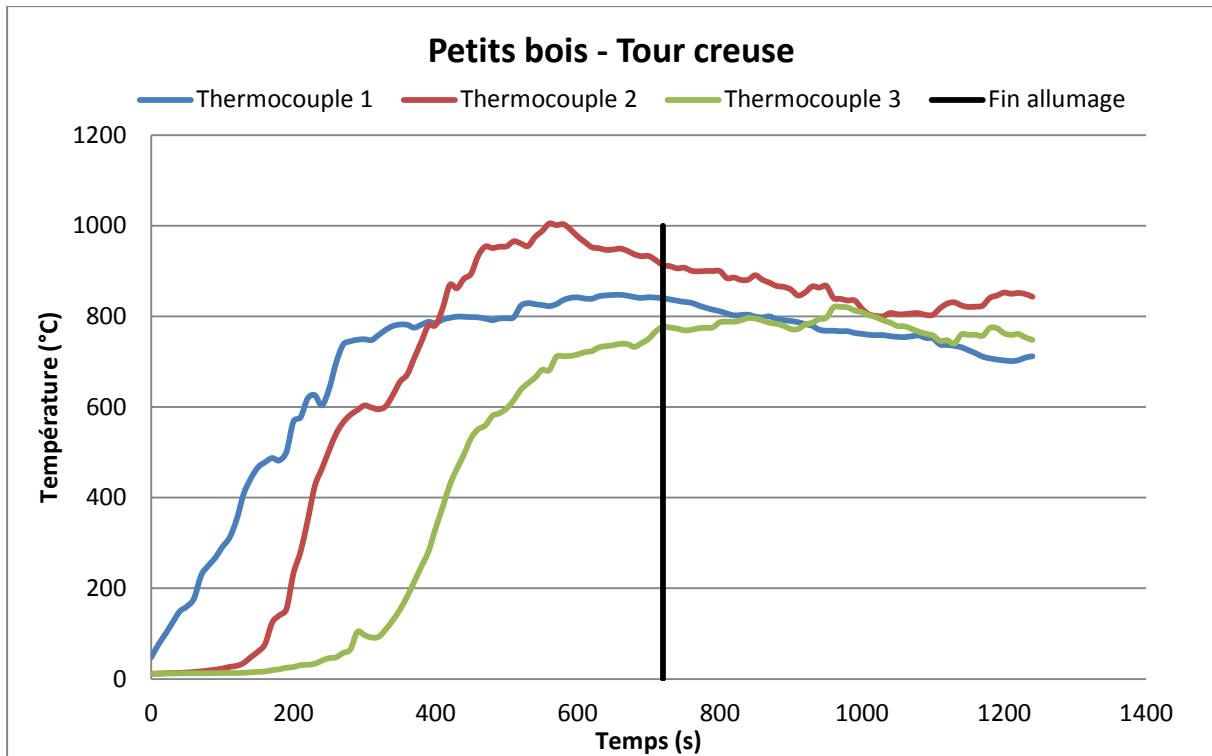
#### Test 1 : Evolution des températures dans le lit de braises



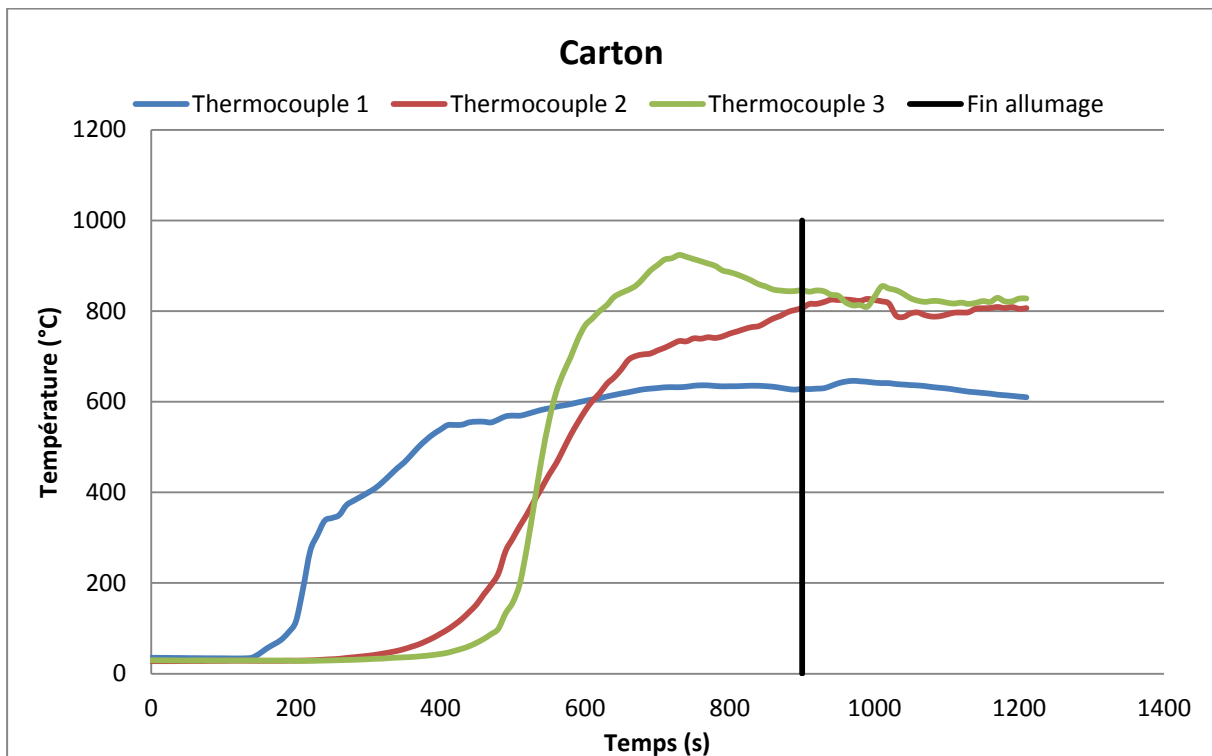
#### Test 2 : Evolution des températures dans le lit de braises



#### Test 3 : Evolution des températures dans le lit de braises



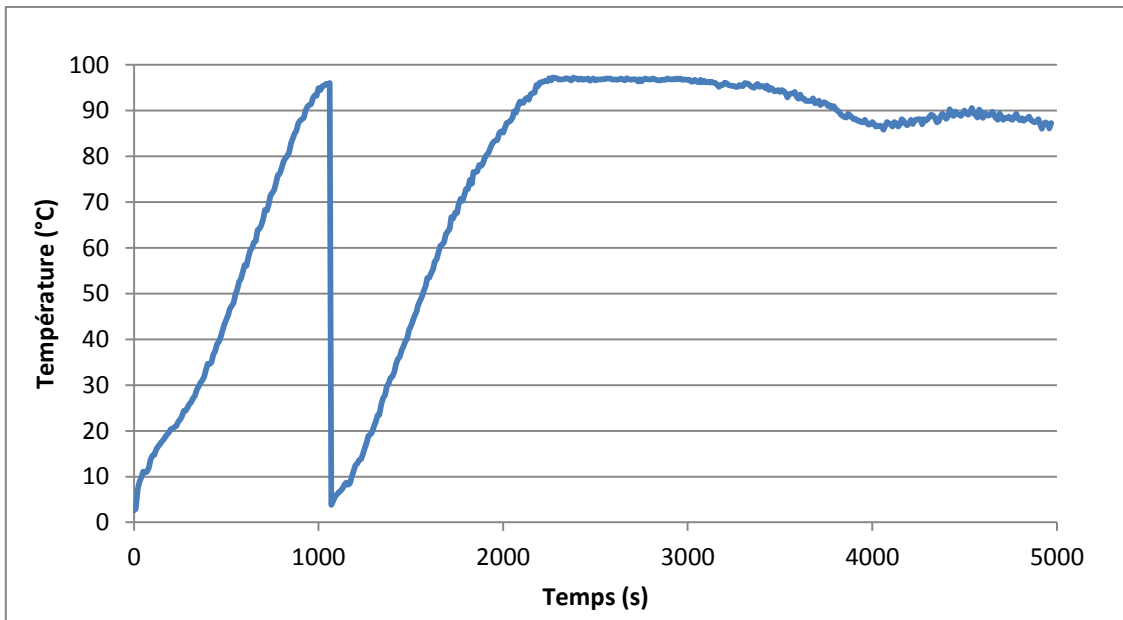
Test 4 : Evolution des températures dans le lit de braises



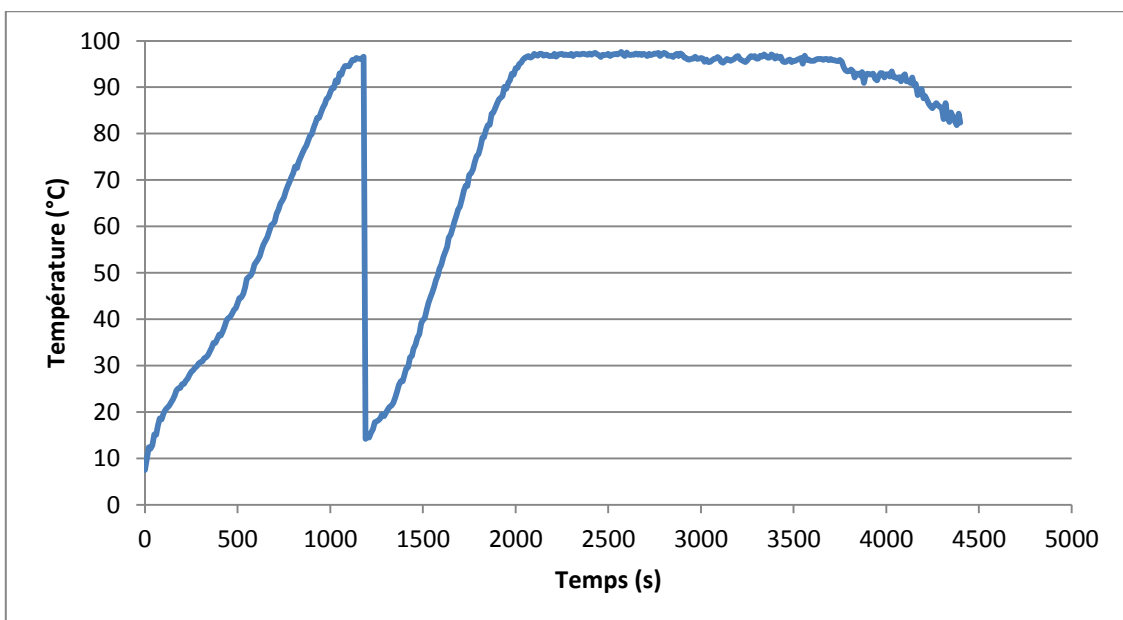
## Annexe 4 : Tests d'ébullition de l'eau avec du charbon de bois

### Tests d'ébullition de l'eau sans modifications du foyer

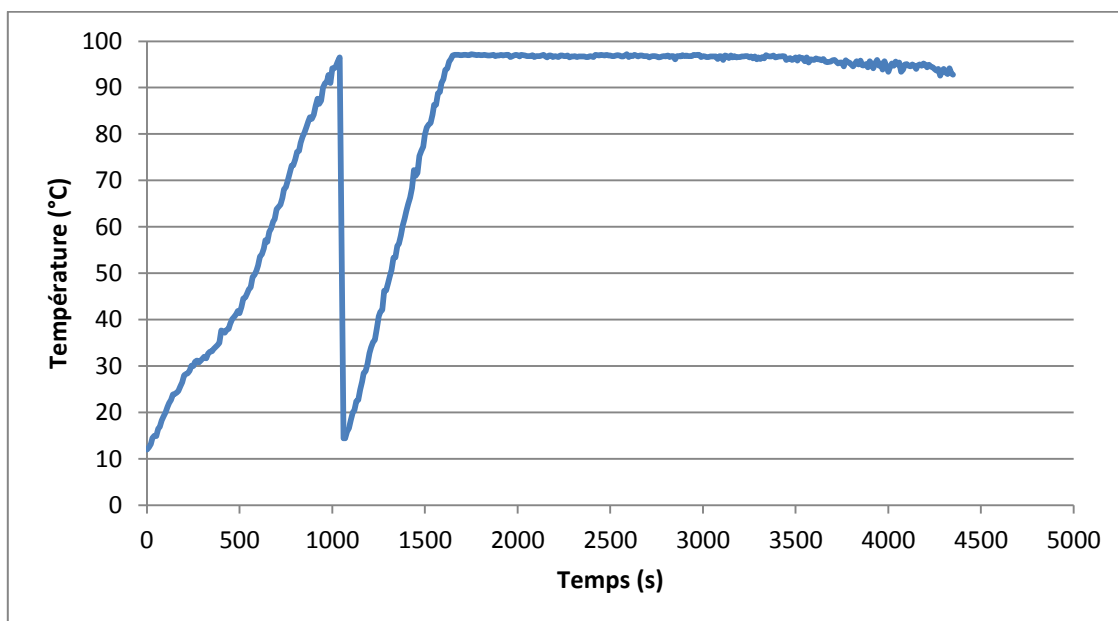
#### Test 1 : Température de l'eau en fonction du temps



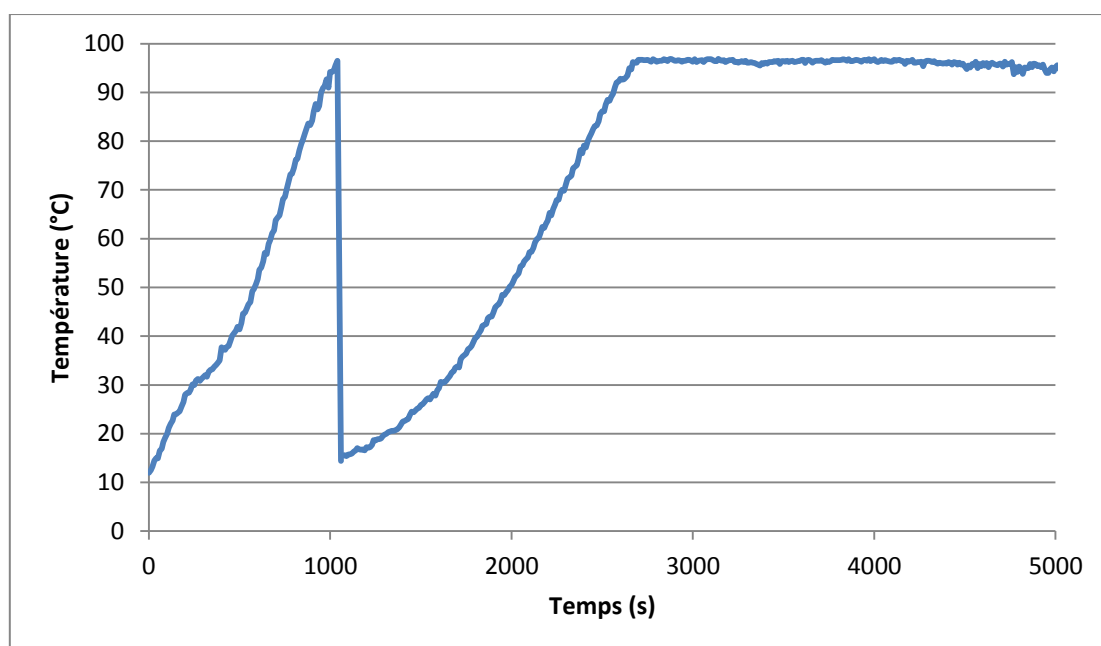
#### Test 2 : Température de l'eau en fonction du temps



### Test 3bis : Température de l'eau en fonction du temps

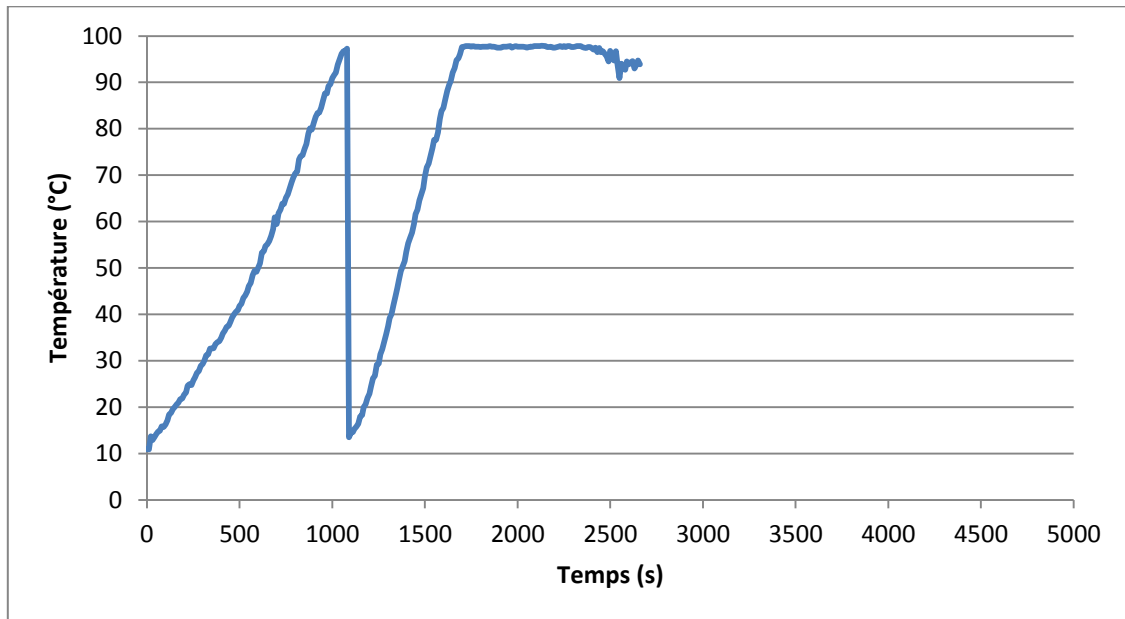


### Test 4 : Température de l'eau en fonction du temps

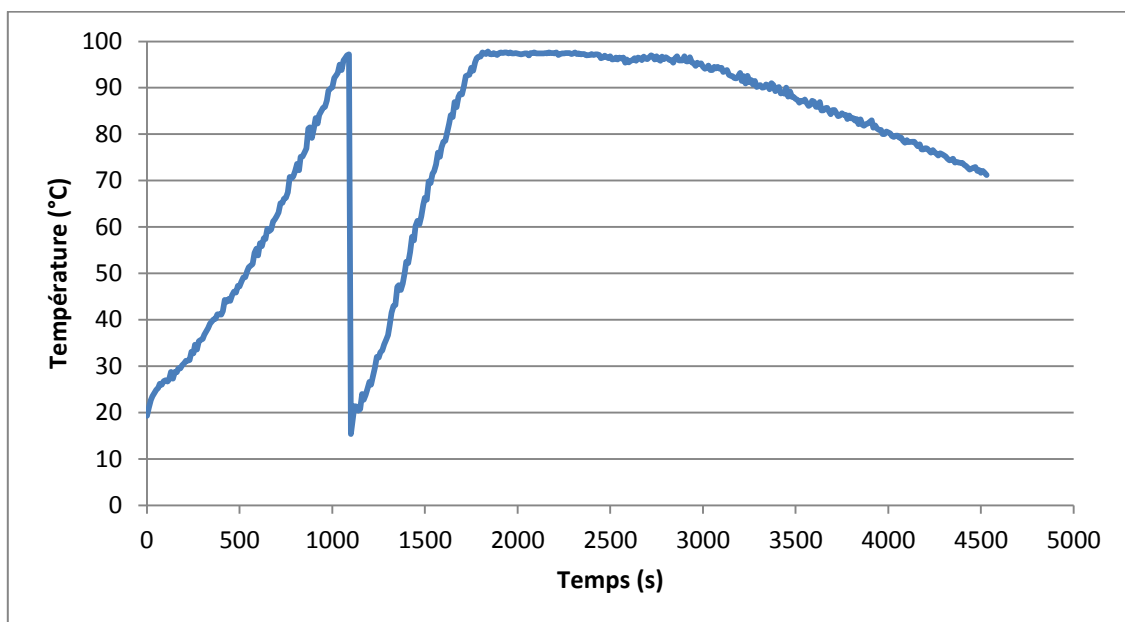


## Test d'ébullition de l'eau avec la grille

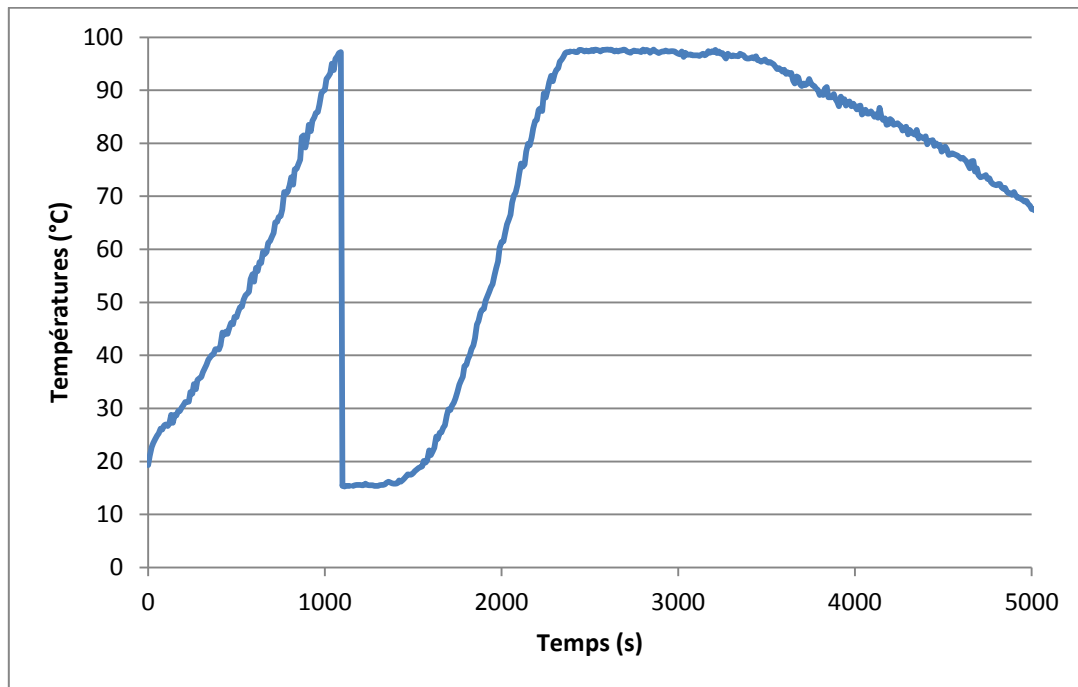
### Test 6 : Température de l'eau en fonction du temps



### Test 7 : Température de l'eau en fonction du temps

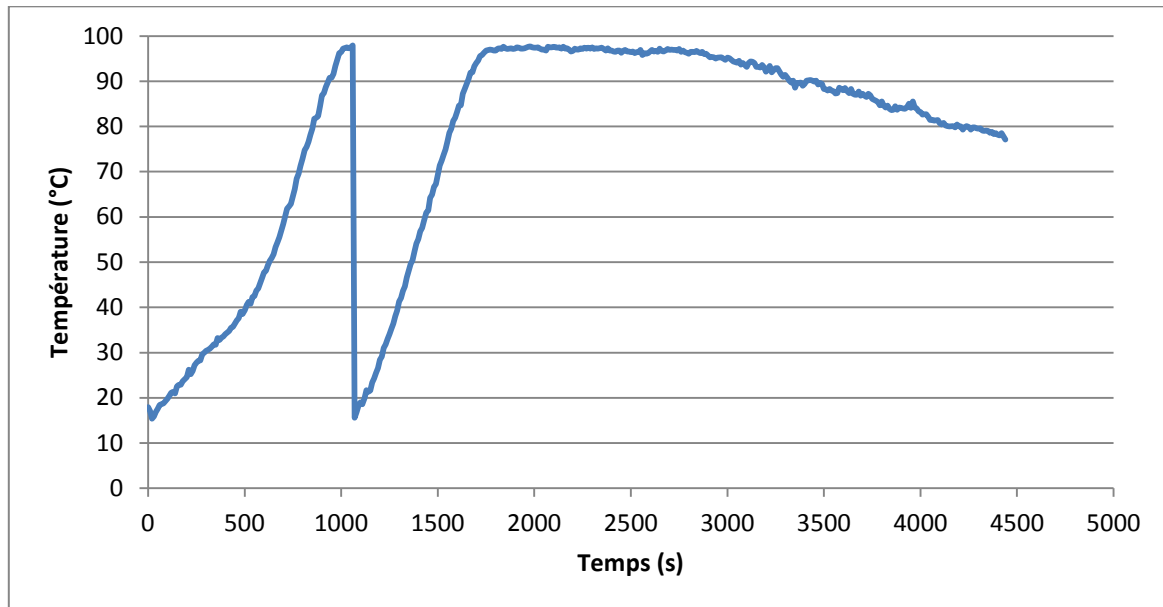


## Test 8 : Température de l'eau en fonction du temps

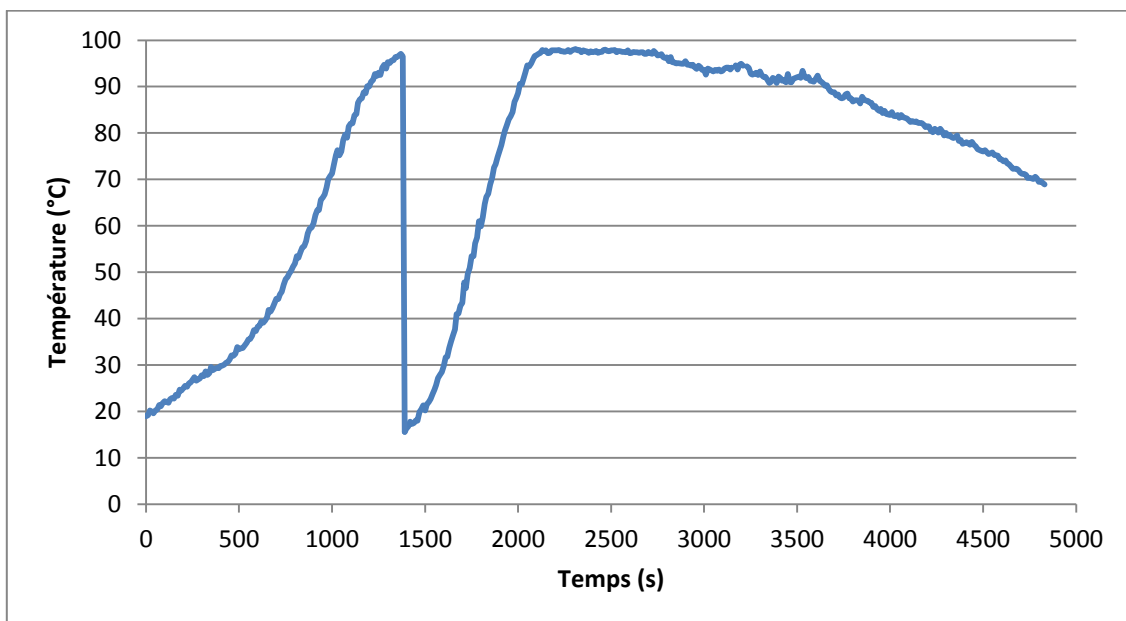


## Test d'ébullition de l'eau avec la grille et réduction de l'arrivée d'air

### Test 9 : Température de l'eau en fonction du temps

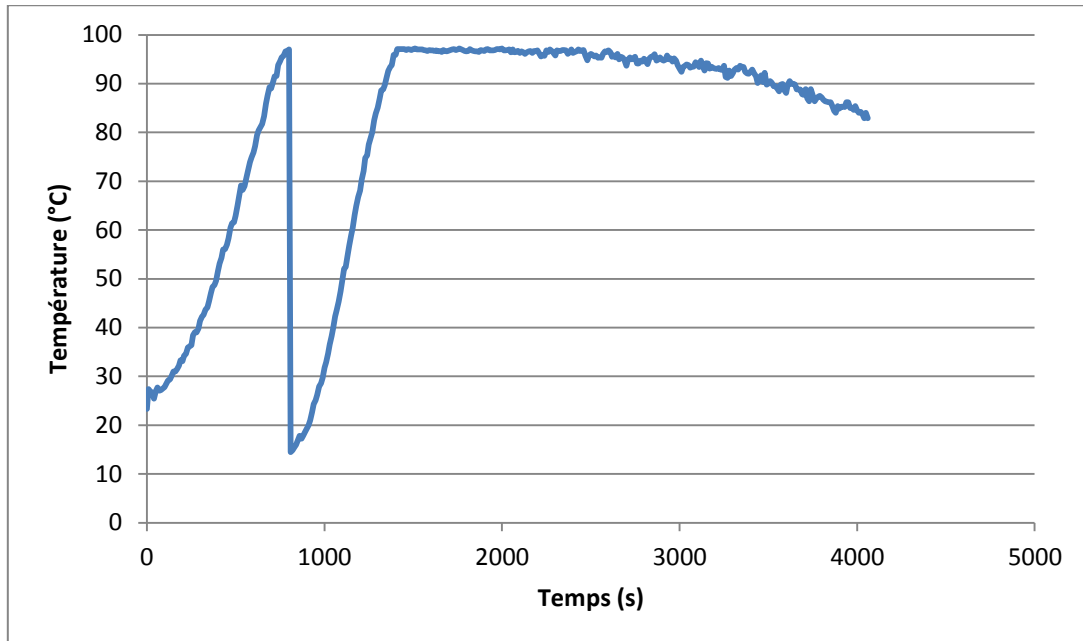


### Test 10bis : Température de l'eau en fonction du temps

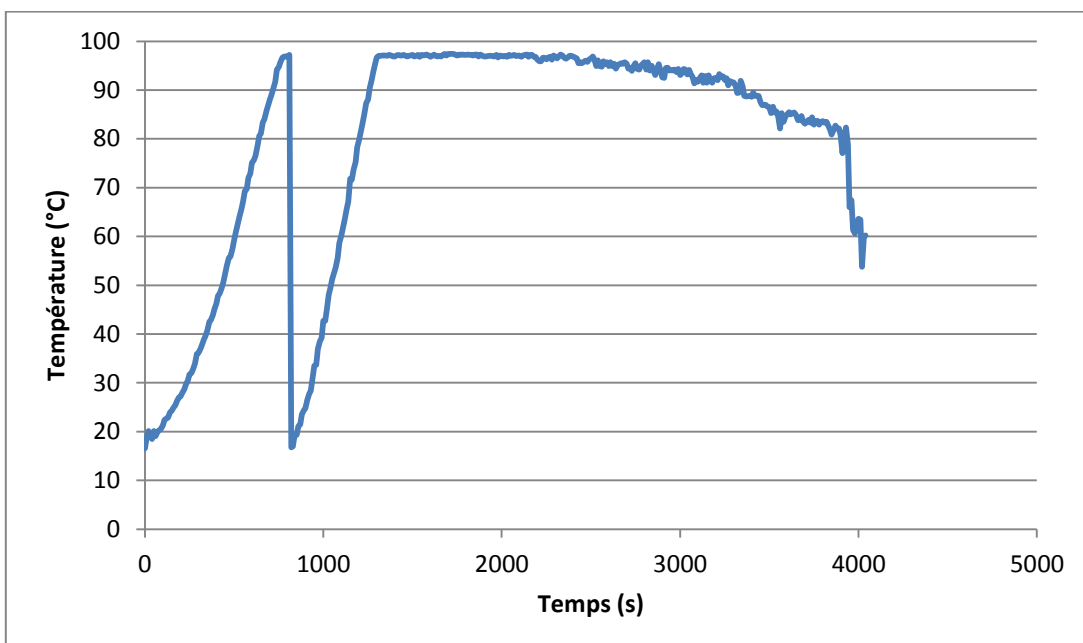


## Test d'ébullition de l'eau avec la grille, la collerette et réduction de l'arrivée d'air

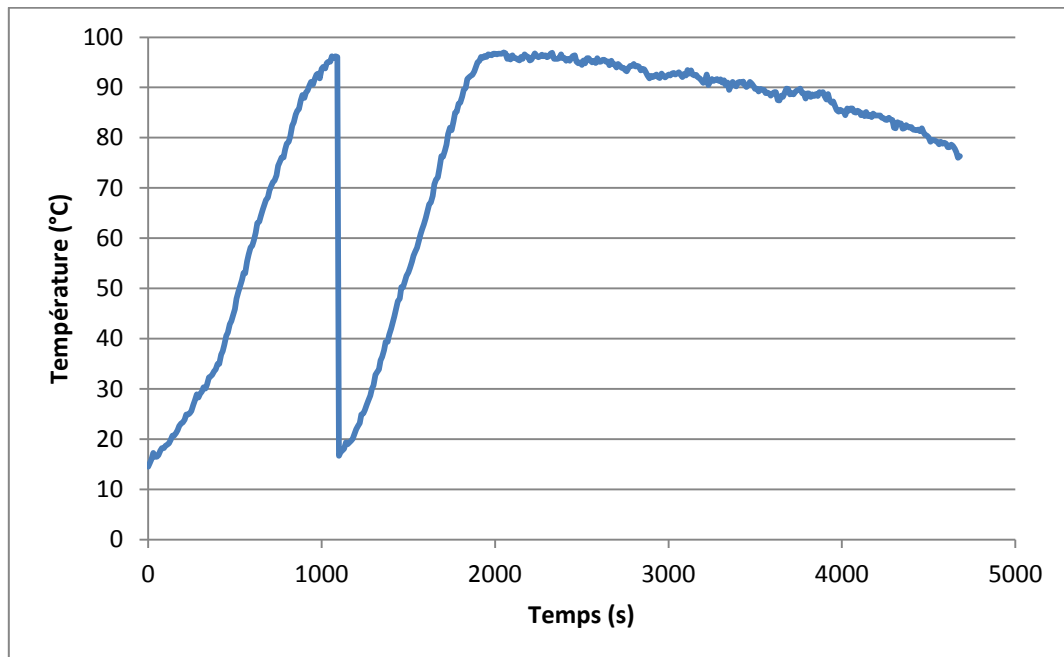
Test 13 : Température de l'eau en fonction du temps



Test 14 : Température de l'eau en fonction du temps



## Test 15 : Température de l'eau en fonction du temps



## Annexe 5 : Résultats des tests sur le charbon de bois

Descriptif	N° Test	Phase	T eau initiale (°C)	T eau finale (°C)	Delta T (°C)	Meau initiale (kg)	Meau finale (kg)	M charbon initiale (kg)	M charbon finale (kg)	Meau évaporée (kg)
Test d'ébullition sans modification du foyer	Test 1	Démarrage à froid	2,6	96	X	2,54	2,43	0,71	0,42	0,11
		Démarrage à chaud	3,8	96,6	X	2,51	2,37	0,66	0,45	0,14
		Mijotage	X	X	40	2,37	1,65	0,51	0,22	0,72
	Test 2	Démarrage à froid	7,5	96,6	X	2,50	2,37	0,73	0,44	0,13
		Démarrage à chaud	14,2	96,6	X	2,49	2,38	0,71	0,52	0,11
		Mijotage	X	X	40	2,38	1,53	0,57	0,31	0,85
	Test 3	Démarrage à froid	12	14,4	X	2,44	2,41	0,69	0,43	0,04
		Démarrage à chaud	Problème de mesure de masse							
		Mijotage								
	Test 3 bis	Démarrage à froid	Les données utilisées sont celles du Test 3							
		Démarrage à chaud	14,4	97,1	X	2,47	2,42	0,68	0,54	0,05
		Mijotage	X	X	40	2,42	1,23	0,59	0,22	1,18
	Test 4	Démarrage à froid	Les données utilisées sont celles du Test 3							
		Démarrage à chaud	15,5	96,7	X	2,51	2,40	0,79	0,54	0,11
		Mijotage	X	X	40	2,40	1,33	0,59	0,29	1,07
Test d'ébullition avec grille	Test 5	Démarrage à froid	Test relatif à la quantité d'O2 dans les braises dans les cas d'une ébullition de l'eau, non utilisé pour les calculs car impact sur la variation de masse							
		Démarrage à chaud								
		Mijotage								
	Test 6	Démarrage à froid	11	97,3	X	2,46	2,39	0,86	0,60	0,07
		Démarrage à chaud	13,5	97,8	X	2,45	2,34	0,83	0,60	0,11
		Mijotage	Problème de mesure de masse							
	Test 7	Démarrage à froid	19,3	15,4	X	2,50	2,44	0,68	0,42	0,06
		Démarrage à chaud	18,6	97,6	X	2,53	2,45	0,64	0,43	0,07
		Mijotage	X	X	40	2,45	1,59	0,48	0,15	0,87
	Test 8	Démarrage à froid	Les données utilisées sont celles du Test 7							
		Démarrage à chaud	15,4	97,3	X	2,52	2,42	0,76	0,42	0,10
		Mijotage	X	X	40	2,42	1,59	0,47	0,15	0,83
Test d'ébullition avec grille et réduction d'air en mijotage	Test 9	Démarrage à froid	17,9	97,9	X	2,45	2,35	0,65	0,39	0,10
		Démarrage à chaud	15,6	95,8	X	2,45	2,39	0,63	0,43	0,06
		Mijotage	X	X	40	2,39	1,37	0,48	0,09	1,02
	Test 10	Démarrage à froid	19	15,6	X	2,46	2,33	0,64	0,35	0,13
		Démarrage à chaud	Cables d'acquisition arrachés							
		Mijotage								
	Test 10 bis	Démarrage à froid	Les données utilisées sont celles du Test 10							
		Démarrage à chaud	15,6	97,3	X	2,47	2,34	0,63	0,40	0,13
		Mijotage	X	X	40	2,34	1,41	0,45	0,09	0,93
	Test 11	Démarrage à froid	Pas de ruban adhésif aluminium et charbon trop fin (fond de sac)							
		Démarrage à chaud								
		Mijotage								
Test d'ébullition avec grille, colerette et réduction d'air en mijotage	Test 12	Démarrage à froid	Echec Allumage							
		Démarrage à chaud								
		Mijotage								
	Test 13	Démarrage à froid	23,3	97	X	2,50	2,20	0,60	0,37	0,30
		Démarrage à chaud	14,5	97,1	X	2,54	2,28	0,60	0,44	0,26
		Mijotage	X	X	40	2,28	0,62	0,49	0,11	1,66
	Test 14	Démarrage à froid	16,6	97,2	X	2,50	2,20	0,60	0,40	0,30
		Démarrage à chaud	16,8	97,1	X	2,50	2,24	0,60	0,44	0,26
		Mijotage	X	X	40	2,24	0,46	0,49	0,07	1,78
	Test 15	Démarrage à froid	14,5	96,1	X	2,50	2,16	0,60	0,38	0,34
		Démarrage à chaud	16,7	96,7	X	2,50	2,16	0,60	0,42	0,34
		Mijotage	X	X	40	2,16	0,80	0,46	0,14	1,36

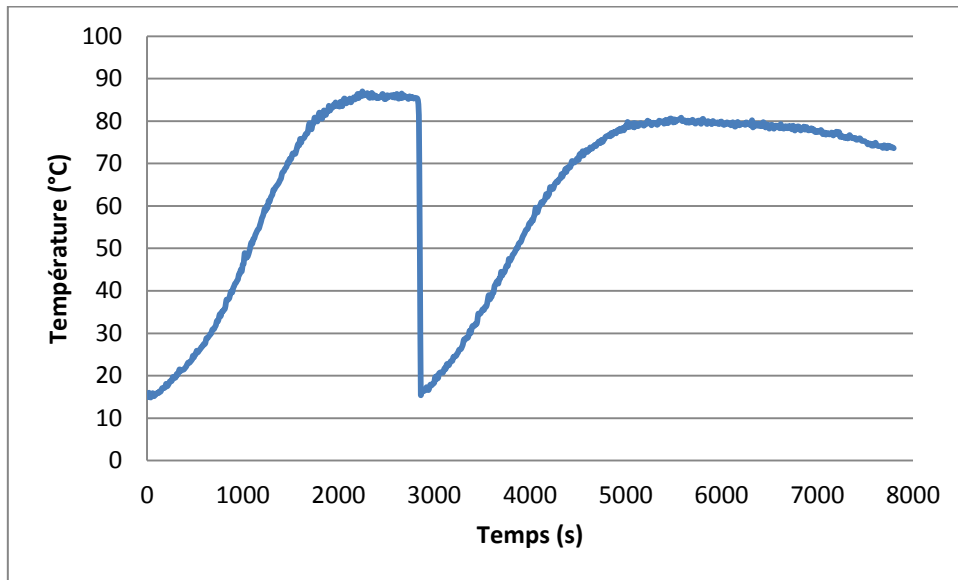
# Annexes

Descriptif	N° Test	Phase	Rendement (%)	Rendement moyen (%)	Temps (min)	Vitesse de combustion (g/h)	Vitesse de combustion moyenne (g/h)	Temps d'ébullition (min)
Test d'ébullition sans modification du foyer	Test 1	Démarrage à froid	15	21	18	971	572	25
		Démarrage à chaud	20		20	651		
		Mijotage	24		45	381		
	Test 2	Démarrage à froid	15	24	20	876	605	34
		Démarrage à chaud	19		15	760		
		Mijotage	31		39	407		
	Test 3	Démarrage à froid	2	X	18	890	X	X
		Démarrage à chaud			X	X		
		Mijotage			X	X		
	Test 3 bis	Démarrage à froid		22	18	898	650	45
		Démarrage à chaud	22		10	1546		
		Mijotage	29		45	351		
	Test 4	Démarrage à froid		21	18	898	545	40
		Démarrage à chaud	15		27	552		
		Mijotage	33		44	401		
Test d'ébullition avec grille	Test 5	Démarrage à froid		X				
		Démarrage à chaud						
		Mijotage						
	Test 6	Démarrage à froid	14	X	18	847	X	X
		Démarrage à chaud	16		11	1283		
		Mijotage			X	X		
	Test 7	Démarrage à froid	1	18	18	851	629	24
		Démarrage à chaud	16		12	1055		
		Mijotage	25		45	429		
	Test 8	Démarrage à froid		15	18	851	538	22
		Démarrage à chaud	11		39	522		
		Mijotage	25		45	424		
Test d'ébullition avec grille et réduction d'air en mijotage	Test 9	Démarrage à froid	13	20	18	893	693	26
		Démarrage à chaud	16		11	1080		
		Mijotage	24		45	520		
	Test 10	Démarrage à froid	3	X	23	751	X	X
		Démarrage à chaud						
		Mijotage						
	Test 10bis	Démarrage à froid		17	23	751	658	20
		Démarrage à chaud	17		12	1150		
		Mijotage	24		45	479		
	Test 11	Démarrage à froid		X				
		Démarrage à chaud						
		Mijotage						
Test débulliton avec grille, colerette et réduction air en mijotage	Test 12	Démarrage à froid		X				
		Démarrage à chaud						
		Mijotage						
	Test 13	Démarrage à froid	22	34	13	1017	683	34
		Démarrage à chaud	31		10	960		
		Mijotage	38		44	518		
	Test 14	Démarrage à froid	26	34	14	884	697	32
		Démarrage à chaud	30		9	1136		
		Mijotage	37		45	557		
	Test 15	Démarrage à froid	25	32	18	740	561	21
		Démarrage à chaud	30		15	744		
		Mijotage	38		45	427		

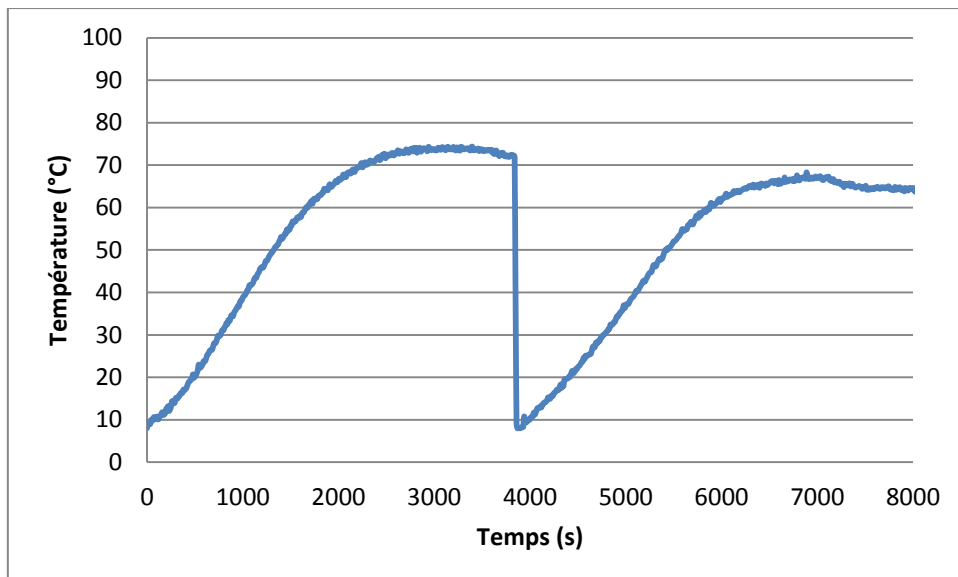
## Annexe 6 : Tests d'ébullition de l'eau avec du charbon de typha

### Tests d'ébullition de l'eau sans modifications du foyer

Test 16 : Evolution de la température de l'eau en fonction du temps

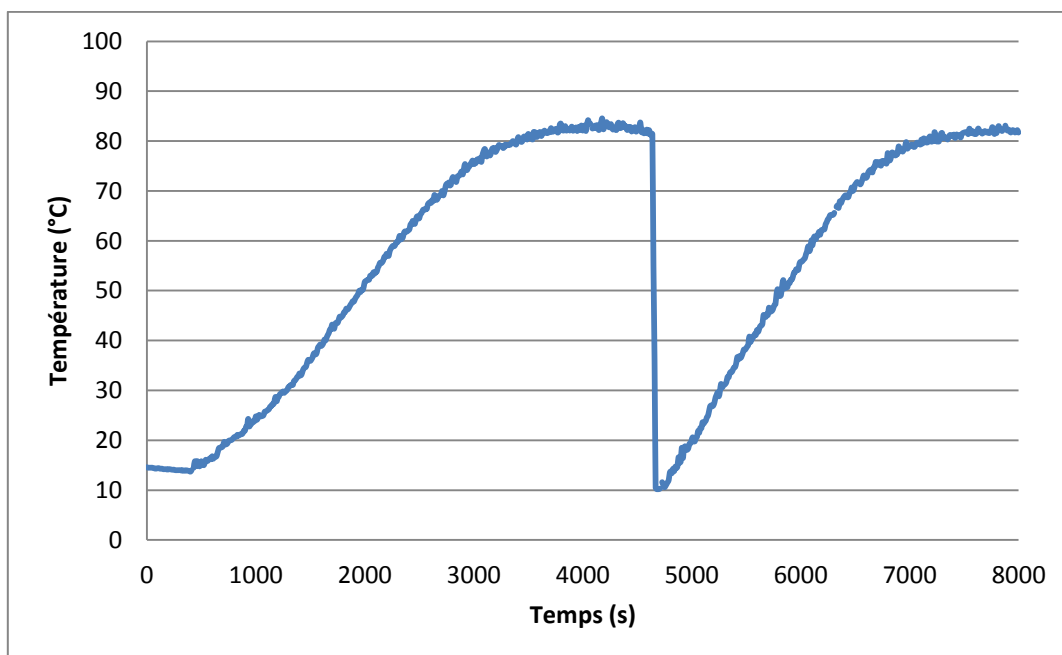


Test 17 : Evolution de la température de l'eau en fonction du temps

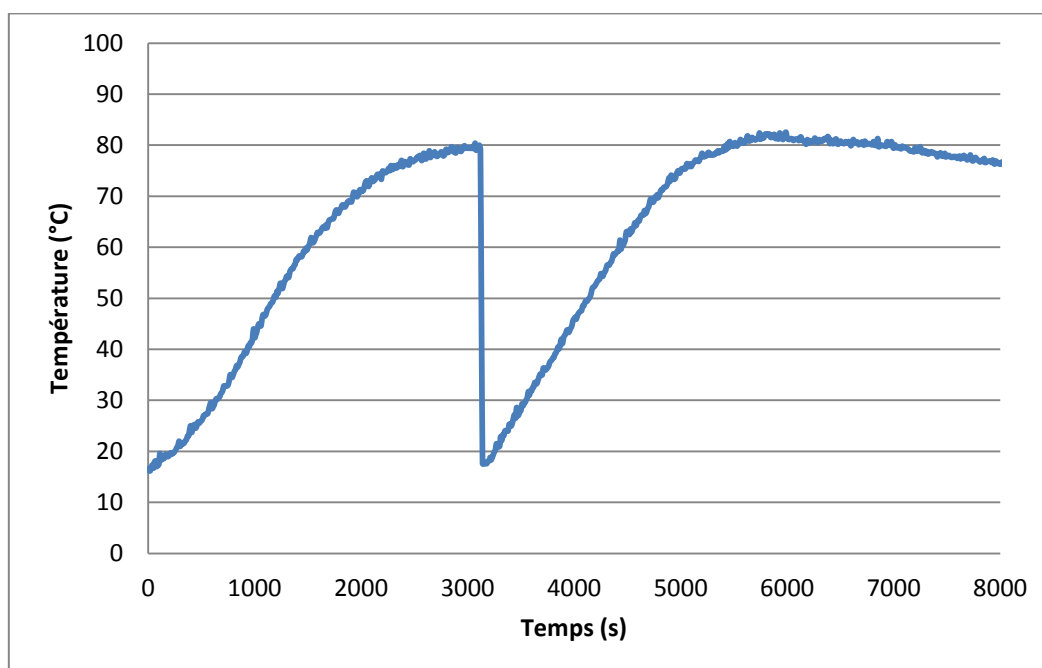


## Tests d'ébullition de l'eau avec grille et collerette

Test 18 : Evolution de la température de l'eau en fonction du temps



Test 19 : Evolution de la température de l'eau en fonction du temps



## Annexe 7 : Résultats des tests sur le charbon de typha

Descriptif	N° Test	Phase	T eau initiale (°C)	T eau finale (°C)	Delta T (°C)	M eau initiale (kg)	M eau finale (kg)	M charbon initiale (kg)	M charbon finale (kg)	Meau évaporée (kg)
Test typha initial	Test 16	Démarrage à froid	15.2	87	X	2.45	1.99	1.00	0.70	0.46
		Démarrage à chaud	16.8	80.8	X	2.43	2.03	0.98	0.81	0.40
		Mijotage	X	X	40	2.03	1.69	0.89	0.72	0.34
	Test 17	Démarrage à froid	8	74	X	2.45	2.07	1.00	0.74	0.38
		Démarrage à chaud	8.1	67	X	2.45	2.15	0.99	0.79	0.30
		Mijotage	X	X	40	2.15	1.91	0.87	0.75	0.24
Test typha amélioré	Test 18	Démarrage à froid	14.5	83.5	X	2.45	1.89	1.00	0.70	0.56
		Démarrage à chaud	11.6	82.4	X	2.43	2.03	0.96	0.73	0.40
		Mijotage	X	X	40	2.03	1.65	0.81	0.68	0.38
	Test 19	Démarrage à froid	16.6	80.4	X	2.45	1.99	1.00	0.77	0.46
		Démarrage à chaud	18.8	81	X	2.43	2.09	0.95	0.78	0.34
		Mijotage	X	X	40	2.09	1.63	0.87	0.70	0.46

		Energie de chauffe de l'eau (kJ)	Energie de vaporisation de l'eau (kJ)	Energie charbon (kJ)	Rendement (%)	Rendement moyen (%)	Temps (min)	Vitesse de combustion (g/h)	Vitesse de combustion moyenne (g/h)	Temps d'ébullition (min)
Test typha initial	Test 16	735	1155.06	5377.41	35	42	38	477	328	35
		650	1004.40	3121.79	53		44	235		
		311	853.74	3175.92	37		37	287		
	Test 17	676	954.18	4709.74	35	38	48	325	247	94
		603	753.30	3645.09	37		49	249		
		339	602.64	2183.45	43		45	161		
Test typha amélioré	Test 18	706.63	1406.16	5395.46	39	44	61	293	253	23
		719.14	1004.40	4294.71	40		52	276		
		307.65	954.18	2345.85	54		45	173		
	Test 19	653.38	1155.06	4168.40	43	47	51	271	250	41
		631.79	853.74	3067.65	48		40	253		
		310.99	1155.06	3031.56	48		45	224		

## **Résumé**

Ce rapport est le fruit d'un long travail dans le cadre des projets de fin d'études associés à notre troisième et dernière année à l'ENSTIB.

Le projet a débuté en septembre 2015 pour prendre fin début février 2016. Nous avons choisi celui-ci par intérêt que nous portons à la filière énergie mais aussi parce qu'il possède une dimension très humaine.

Le sujet était plutôt vague, nous ne savions pas si il fallait comparer plusieurs foyers améliorés entre eux ou alors améliorer le foyer multi marmite principalement utilisé en Mauritanie. Une chose était sûre, le combustible utilisé devait être le charbon de typha.

Nous avons travaillé en partenariat avec le GRET (Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques) qui nous a fourni un foyer cuiseur et du charbon.

Nous avons donc décidé de nous focaliser sur la caractérisation du foyer multi marmite avec l'utilisation de charbon de typha comme combustible. Notre principal objectif était de comprendre le phénomène de combustion, de quantifier les paramètres associés à ce phénomène et d'apporter des améliorations au système.

Nous avons essayé de travailler le maximum en autonomie mais les aides apportées par les membres du LERMAB, par les membres de l'atelier de l'école et par les membres du GRET et de l'ISSET nous ont été indispensables.

D'un point de vue scientifique et technique, nous retenons du projet que le foyer possède des performances énergétiques assez basses. Il est possible de les améliorer mais le foyer a ses limites.

Concernant les améliorations, il est préférable d'utiliser une grille de rétention des braises qui limite les pertes de charge de l'air entrant. De plus le confinement des fumées dans le foyer améliore lui aussi les performances de celui-ci.

Le charbon de typha se consomme beaucoup plus lentement que du charbon de bois de par sa nature compacte et moins poreuse ce qui fait de lui un combustible très pratique à utiliser durant les phases de mijotage d'un plat. Il possède un pouvoir calorifique très appréciable pour une ressource de ce genre.

Le typha est une ressource locale dont la transformation de celui-ci en charbon illustre une gestion intelligente du patrimoine écologique mauritanien.