

Le Cuiseur 2.0

Problématique :

Quel Cuiseur à Bois Économe pour Tizi N'Oucheg ?



Tizi N'Oucheg, le lundi 14 octobre 2019



Noa BREBION
Théo DAMANGE
Adam FRIGNAC

Lycée Jacques de Vaucanson, Tours (37)

Sciences à l'École



SOMMAIRE

Introduction	2
L'association Bolivia Inti Sud Soleil	2
Pourquoi utiliser des cuiseurs à bois économes ?	3
Les caractéristiques des cuiseurs à bois économes à disposition	3
A- Comment juger de l'efficacité d'un cuiseur ?	5
1) Efficacité « écolo-énergétique »	5
a) Quel protocole ?	5
b) Nos résultats	7
2) Efficacité « écolo-sanitaire »	9
a) Monoxyde de carbone et mesures	9
b) Particules fines et mesures	11
B- Notre nouveau modèle est-il plus efficace ?	15
1) Plans d'un nouveau modèle	15
2) Efficacité « écolo-énergétique »	17
3) Efficacité « écolo-sanitaire »	18
a) Mesures du taux de particules	18
b) Mesures de la température du foyer	18
Conclusion	19
Bibliographie	20
Annexes	21

RESUMÉ

Depuis 2012, l'association Vauc'en Sciences est engagée au Maroc pour promouvoir la cuisson économe. Cette fois, nous avons pour objectif, avec l'aide de l'ONG Bolivia Inti Sud Soleil (BISS), d'implanter 110 Cuiseurs à Bois Economes (CBE) dans le village de Tizi N'Oucheg dans le haut Atlas de la vallée de l'Ourika avant l'hiver 2019.

BISS a mis à notre disposition différents modèles de CBE dont nous avons décidé de tester l'efficacité énergétique et écologique afin de faire le meilleur choix. Cependant face aux résultats mitigés que nous avons obtenus, nous avons décidé de dessiner notre propre modèle tenant compte des avantages et inconvénients de chacun. Satisfaits de ses performances, nous sommes fiers d'être allés installer les 110 premiers Cuiseurs 2.0 du 12 au 19 octobre 2019 et prévoyons déjà l'installation des 400 suivants.

Lien vers une vidéo résumant le projet dans sa globalité : <https://youtu.be/0K0kUPhfXq8>

Page facebook du projet : [Distilla'Sun ou la cuisson économe au Maroc](#)

INTRODUCTION



Depuis 2012, notre lycée, à travers l'association Vauc'en Sciences, est lié au Maroc pour promouvoir la cuisson économe. En septembre 2017, lors de leur déplacement dans le village de Tizi N'Oucheg, situé dans le Haut Atlas de la vallée de l'Ourika, nos prédécesseurs avaient pour objectif de promouvoir l'utilisation de paraboles solaires pour la cuisson de confitures. Face à un ensoleillement capricieux, ils ont dû avoir recours à plusieurs reprises à des Cuiseurs à Bois Economes (C.B.E.) qu'ils avaient pris en secours. Ces cuiseurs développés par l'association Bolivia Inti Sud Soleil (BISS) ont beaucoup plu à l'association de développement de Tizi N'Oucheg. C'est ainsi qu'il a été décidé d'un commun accord entre les différents responsables des associations citées, d'installer un CBE dans chaque habitation du village, soit au total 110 unités.



BISS a mis à notre disposition plusieurs modèles que ses membres avaient mis au point et nous nous sommes donnés comme objectifs **de déterminer le plus efficace, le cas échéant de lister les inconvénients et avantages de chacun pour aboutir à un nouveau modèle pour le village de Tizi N'Oucheg.**

Tout d'abord, qu'est-ce que Bolivia Inti Sud Soleil ?

BISS est une association française à but non-lucratif créée en 1999. Elle intervient dans de nombreux pays en voie de développement, en Afrique et dans les Andes. Cette association mène des actions solidaires de promotion d'outils de cuisson simples à utiliser, tels que des cuiseurs solaires ou des cuiseurs à bois économes, dans le but d'améliorer les conditions de vie des populations locales. Mais elle a également pour finalité de lutter contre le réchauffement climatique en proposant des solutions utilisant moins d'énergie fossile et plus d'énergie renouvelable. En effet, l'utilisation des cuiseurs mis au point par BISS contribue à la réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère (1 tonne par an et par cuiseur en moyenne selon le protocole international "Gold Standard").



Pourquoi utiliser des Cuiseurs à Bois Economes ?

Les cuiseurs écologiques viennent remplacer l'utilisation du foyer traditionnel, plus communément appelé four «trois pierres». Il est en effet constitué de trois pierres disposées en triangle sur lesquelles est posée la marmite. Un espace est créé entre chaque pierre pour y introduire le bois. Ce type de four est le plus utilisé en Afrique de l'Ouest car il ne demande pas d'investissement financier, ni à la mise en marche, ni pour d'éventuelles réparations. Le plus souvent, chaque famille possède plusieurs foyers de ce type : certains à l'extérieur dans la cour, et d'autres à l'intérieur de l'habitation pour l'utiliser en cas de pluie, de grand vent ou en hiver dans les montagnes.



Exemple de four « trois pierres »

Cependant, plusieurs aspects de ce four posent problèmes :

- Il dégage énormément de fumées qui portent atteinte à la santé des utilisateurs,
- Il consomme beaucoup de bois contribuant ainsi au réchauffement climatique avec de fort dégagement de CO₂ et à la déforestation des paysages,
- D'autre part, il est dangereux pour les usagers et particulièrement pour les enfants, à cause des braises ou du renversement de la marmite qui manque de stabilité.

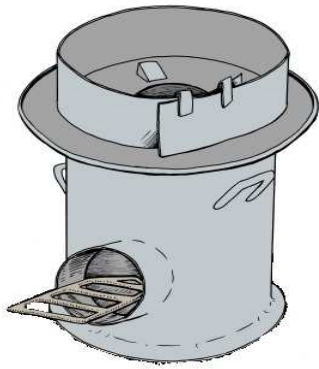


Schéma du CBE classique

Ainsi dans tout dispositif le bois est dans un premier temps séché puis carbonisé, mais très rarement des températures de 800°C sont atteintes pour brûler totalement les particules et

Les cuiseurs à bois économes (CBE) vont permettre, dans un premier temps, une économie considérable de bois (60 à 80% de moins dans les conditions optimales), mais aussi de limiter les rejets de gaz et fumées toxiques. En effet, à l'intérieur d'un CBE, on cherche à optimiser la combustion du bois en faisant en sorte qu'elle soit la plus aboutie possible. La combustion du bois est un phénomène complexe qui a lieu en plusieurs étapes et nécessite des conditions de température particulières comme le résume le schéma ci-dessous.

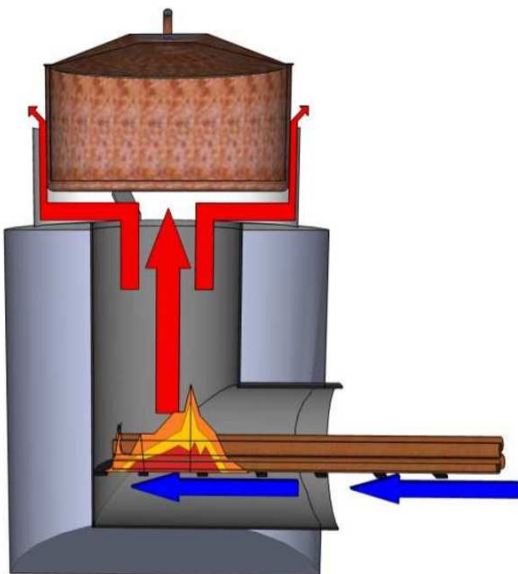
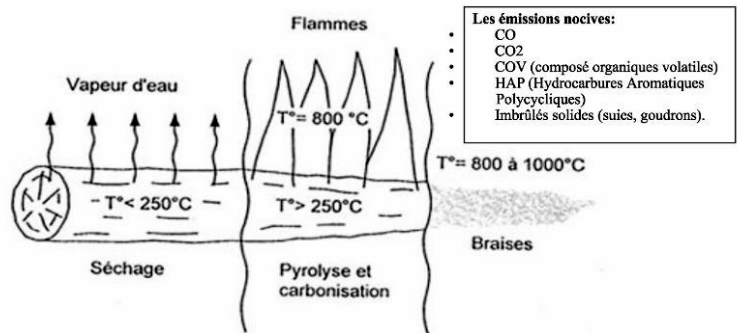


Schéma du fonctionnement d'un CBE

gaz qui se dégagent. La combustion n'est donc pas poussée à son extrême donc « incomplète ». Non seulement de l'énergie est perdue (60 à 80%) mais ces gaz sont toxiques.

Ainsi l'enjeu majeur dans un CBE est d'atteindre une température de 700 à 800°C pour optimiser la combustion et par la même de diminuer la toxicité des fumées.

Pour ce faire, tous les CBE existants confinent au maximum le foyer en l'isolant tout en le laissant accessible pour approvisionner en bois et laisser entrer l'air.

D'autre part, les braises sont situées à l'intérieur de la cheminée, elles sont donc inaccessibles et les usagers sont mieux protégés des brûlures. La marmite est également plus stable, posée sur une surface plane et entourée d'une chemise de tôle.

Quelles sont les caractéristiques des cuiseurs économes mis à notre disposition ?



Modèle n°1, « CBE classique »

Le modèle « classique » ou modèle n°1

Ce premier modèle développé par BISS à la fin des années 90, est construit à partir d'un bidon usagé de peinture ou solvant. Y a été ajoutée une cheminée en tôle entourée d'un isolant (matière minérale type vermiculite ou cendres)

Il présente un inconvénient majeur car à base de tôle peu épaisse qui vieillit mal et nécessite, de plus, une dépollution avant utilisation compte-tenu des températures qui vont être atteintes.

Le modèle « Brique » ou modèle n°2

En créant ce second modèle de CBE, Bolivia Inti Sud Soleil avait pour objectif qu'il soit adapté au Maroc tant en terme de cuissons (plus longues) que des matières premières à disposition (tôle et argile) pour en réduire le coût et allonger la durée de vie.

Tout d'abord, il fallait en réduire le coût de fabrication. Pour cela, BISS a décidé de remplacer le tube coudé métallique par une structure en briques d'argile, facilement réalisables au Maroc où la poterie est une tradition. Ce matériau, et la fabrication locale permettent de produire des cuiseurs bon marchés.

La durée de vie du cuiseur devait être allongée en utilisant une tôle plus épaisse (3 à 4 mm) et des briques réfractaires supportant des températures très élevées sans subir de transformations notables.



Modèle n°2, « CBE brique »

Le modèle « double combustion » ou modèle n°3

Par principe, chaque modèle est censé favoriser la double combustion, c'est-à-dire la combustion des gaz et particules qui se dégagent suite à la carbonisation du bois. Mais faut-il qu'il y ait assez de dioxygène au dessus du bois pour qu'elle ait lieu et qu'elle soit la « plus complète » possible. Ainsi certains de nos prédécesseurs **ont participé avec BISS à l'élaboration d'un nouveau modèle que nous devons tester.**

Ce modèle :

- possède 3 arrivées d'air au-dessus du foyer
- est un peu moins haut pour limiter la quantité de tôle utilisée mais aussi les pertes de chaleur avant de toucher le récipient de cuisson. Il fait suite à une observation des dispositifs dans les habitations marocaines où le récipient est très proche des flammes.



Modèle n°3, « CBE double combustion »

Ces modèles de CBE étant très différents, une étude scientifique rigoureuse sera complexe. Ce sera avec le 3^{ème} modèle que l'approche sera la plus scientifique en obstruant ou pas les arrivées d'air, en ajoutant ou pas un isolant.

A. Comment juger de l'efficacité d'un cuiseur ?

Les cuiseurs à bois économes dit C.B.E. ont été mis au point pour réduire la consommation de bois et diminuer le rejet de fumées toxiques. Ainsi, pour juger de leurs efficacités, il va être important d'évaluer la consommation de bois pour effectuer une tâche donnée et tenter de mesurer la « qualité des fumées » produites par leurs fonctionnements. Efficacité énergétique et écologique sont très étroitement liées non seulement par la diminution de la consommation de bois, mais aussi par le fait que si la combustion est complète, moins de bois est consommé, mais aussi moins de particules et de gaz toxiques sont rejetés.

1) Efficacité « écolo-énergétique »

a) Adapted Water Boiling Test (AWBT) et mesures

L'efficacité d'un cuiseur à bois économe se mesure par la masse de bois utilisée et le temps nécessaire pour réaliser une tâche. Lors de nos expériences, nous utiliserons de l'eau dans une cocotte pour remplacer le plat et évaluer la puissance produite par le cuiseur et transmise aux aliments à cuire. Nous ne tiendrons pas compte de la puissance apportée au récipient qui sera le même dans chaque situation.

L'Adapted Water Boiling Test ou Test d'Ébullition de l'Eau :

En français, le Test d'Ébullition de l'Eau (TEE) est une méthode normalisée du processus de cuisson développée par Geres Cambodia. Il consiste à mesurer la masse de combustible (ici le bois) et le temps nécessaire pour porter à ébullition un certain volume d'eau (4,0 L pour nous, disposant de cocottes de 5 L). Cette opération est généralement renouvelée une fois dans la foulée pour tenir compte de l'inertie thermique de certains dispositifs et avoir des mesures également à chaud. Parfois, nous l'avons renouvelée jusqu'à trois fois pour multiplier les mesures ou parce que le dispositif avait une grande inertie et qu'il n'avait pas atteint un régime permanent (cuiseur n°2).

Etapes du protocole :

- Introduire 4,000 L d'eau dans la cocotte, mesuré à l'aide d'une fiole jaugée de $2,000 \pm 0.005$ L ;
- Peser une quantité de bois initiale qui servira de combustible avec une balance au cg ;
- Vérifier que la température initiale de l'eau est la même pour pouvoir comparer les temps de chauffe (nous avons utilisé l'eau du robinet qui sortait à une température de $15,0 \pm 0,3^\circ\text{C}$, incertitude estimée après étalonnage par la société Trescal) ;
- Allumer le feu et poser la cocotte une fois que celui-ci semble pris tout en déclenchant le chronomètre ;
- Relever éventuellement la température de l'eau à intervalles de temps réguliers pour juger de la régularité du processus ;
- Noter le temps écoulé lorsque l'eau atteint l'ébullition détectée à l'aide du thermomètre par stabilisation de la température mesurée autour de 100°C ;
- Peser le plus rapidement possible la quantité de bois restante à la fois celle dans le foyer et celle non introduite ;
- Renouveler l'expérience avec une cocotte préalablement préparée pour disposer du cuiseur chaud.

Avant de se lancer dans les expériences avec les cuiseurs, nous avons voulu estimer la masse de bois nécessaire (100% résineux avec un taux d'humidité inférieur à 10%) pour faire bouillir ces 4,000 L d'eau sur un dispositif type 3 pierres comme sur la photo ci-contre. Il nous a fallu sur 3 essais, (600 ± 40) g de bois et (27 ± 2) min.

Il est important pour pouvoir comparer les cuiseurs :

- d'utiliser le même type de bois à chaque essai, à savoir même essence et même taux d'humidité. Nous avons donc décidé



Test avec dispositif 3 pierres

d'acheter du bois d'allumage en grande quantité le même jour, type 100% résineux avec un taux d'humidité inférieur à 20% mesuré avec un humidimètre à bois ;

- que l'eau et la cocotte soient toujours à la même température initiale ; quand cela n'était pas le cas nous avons réalisé des mélanges pour que la température initiale soit toujours voisine de 15°C ;
- que la température et plus généralement les conditions soient voisines pour que les pertes par convection soient proches. Nous avons réalisé les tests dans un garage pour limiter l'effet du vent venant perturber le feu et augmenter les pertes par convection, mais aussi pour que les fumées ne s'évacuent pas trop rapidement, se mettant dans les conditions d'une habitation marocaine faiblement ventilée ;
- que la disposition des morceaux de bois, leur nombre et leur apport pour entretien du feu soient semblables. Cela nous a obligé à souvent redémarrer une expérience lorsque l'évolution de la température de l'eau ne semblait pas correcte à cause d'un ralentissement du feu... Nous avons décidé d'apporter les morceaux de bois par 5 à chaque fois.

Nous avons pu remarquer, lors de nos divers essais, que les expériences sont loin d'être reproductibles, d'une part parce que le feu ne s'allume pas toujours aussi facilement, que les morceaux de bois ne sont pas rigoureusement identiques, ou encore que leur disposition n'est pas toujours la même dans le foyer. Ainsi, nous avons pu noter des variations de 10 à 15 % dans les temps mesurés ce qui explique les incertitudes indiquées. Concernant les masses de bois consommées, évaluer la masse de bois et charbon restant dans le four à la fin de l'expérience n'est pas simple compte tenu de la température des différents éléments. Ainsi, nous avons estimé les masses de bois consommées *avec une incertitude absolue de 20 g s'ajoutant à l'incertitude de répétabilité de l'expérience...*

Le calcul de puissance :

$$- E_{\text{reçue par l'eau}} \text{ (en J)} = m_{\text{eau}} \text{ (en g)} * c_{\text{eau}} \text{ (en J/g/K)} * \Delta T = m_{\text{eau}} \text{ (en g)} * c_{\text{eau}} \text{ (en J/g/K)} * (\Theta_f - \Theta_i)$$

$$- P = \frac{E_{\text{reçue}}}{\Delta t} \text{ (en W)} \text{ avec } E_{\text{reçue}} \text{ en J et } \Delta t \text{ en s.}$$

Sachant que:

$$m_{\text{eau}} = 4,00 \text{ kg} = 4,00.10^3 \text{ g} \leftarrow \text{volume d'eau} = 4,00 \text{ Litres mesurés à l'aide d'une fiole jaugée}$$

$$c_{\text{eau}} = 4,180 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1} \leftarrow \text{Capacité calorifique massique de l'eau}$$

$$\Theta_f = 100,0^\circ\text{C} \leftarrow \text{température finale} \quad \Theta_i = 15,0^\circ\text{C} \leftarrow \text{température initiale}$$

$$\Delta T = \Theta_f - \Theta_i \leftarrow \text{différence de température}$$

$$\Delta t \leftarrow \text{temps de chauffe pour atteindre l'ébullition}$$

L'objectif ayant été de chauffer à chaque expérience 4,00 L d'eau de $\Theta_i = 15,0^\circ\text{C}$ à $\Theta_f = 100,0^\circ\text{C}$, l'énergie apportée à l'eau a toujours été la même soit :

$$E_{\text{reçue}} = 4,00.10^3 \times 4,18 \times (100,0 - 15,0) = 1,42 .10^6 \text{ J} = \underline{\underline{1,42 \text{ MJ}}}.$$

Il est intéressant de se demander si la combustion doit être rapide ou non, avec un grand tirage ou non. Si le tirage est trop important, il y a un risque que les fumées soient évacuées trop rapidement et que la deuxième combustion ne se fasse pas correctement. Ce sont des questions auxquelles nous allons essayer de répondre en analysant les résultats de nos expériences.

On peut avoir un four puissant mais utilisant plus de bois et inversement. En effet, seule une petite partie de l'énergie dégagée sert à chauffer l'eau. Cela revient à calculer un rendement : on peut calculer le rapport entre l'énergie reçue et la masse de bois consommée si le temps a un effet néfaste, grandeur que nous appellerons taux de conversion mesuré en kJ/g de bois consommé.

b) Nos résultats

Synthèse des différentes mesures :

CUISEURS A BOIS ECONOMES	MODELE N°1		MODELE N°2 Cuiseur brique			MODELE N°3 Sans Isolation		MODELE N°3 Avec isolation		MODELE N°3 Sans double comb*
	1ère chauffe	2ème chauffe	1ère chauffe	2ème chauffe	3 ^{ème} ** chauffe	1ère chauffe	2ème chauffe	1ère chauffe	2ème chauffe	3ème chauffe
Nombre de tests	6	6	6	6	2	4	4	5	6	2
TEMPS MOYEN D'EBULLITION (en min)	15± 2	12± 1	21± 2	17± 1	15± 1	18± 1	17± 1	16± 1	14± 1	15± 1
PUISSANCE (en kW)	1.6	2.0	1.1	1.4	1.6	1.3	1.4	1.5	1.7	1.6
CONSOMMATION EN BOIS (en g)	410 ± 40	340 ± 40	470 ± 40	360 ± 30	300 ±40	480 ± 30	450 ± 30	410 ± 40	350 ± 30	380 ± ...
TAUX DE CONVERSION (en kJ/g de bois)	3.5	4.2	3.0	3.9	4.7	3.0	3.1	3.5	4.1	3,8
Economie de bois par rapport à un 3 pierres	32%	43%	23%	40%	50%	20%	25%	32%	42%	37%

* : suite à une 2^{ème} chauffe avec isolation, nous avons obstrué les arrivées d'air puis réalisé une 3^{ème} chauffe.

** : 3^{ème} chauffe nécessaire pour le cuiseur n°2 ou cuiseur brique car nous avons constaté avec la caméra infrarouge que ses parois extérieures continuaient à monter en température.

Analyse de ces premiers résultats :

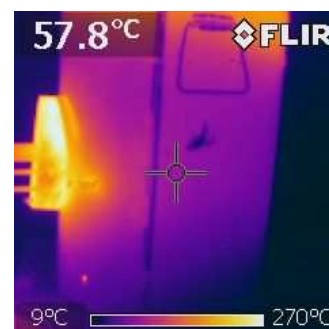
- Point de vue puissance

CBE	MODELE N°1		MODELE N°2			MODELE N°3 Avec isolation	
TEMPS MOYEN D'EBULLITION (en min)	15± 2	12± 1	21± 2	17± 1	15± 1	16± 1	14± 1
PUISSANCE (en kW)	1.6	2.0	1.1	1.4	1.6	1.5	1.7
Comparaison avec le +puissant	-	Réf.	-	-30%	-20%	-	-15%

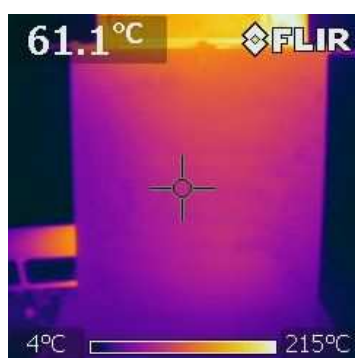
L'ancêtre des cuiseurs fabriqué par BISS, le premier modèle semble être le plus puissant énergétiquement. En effet, il permet de porter à ébullition un même volume d'eau en un temps plus faible. BISS a tenté de le remplacer pour sa faible résistance dans le temps. On peut s'interroger sur ces différences avec les autres :

- Nous avons constaté au cours des différentes expériences, un feu plus vif, avec des flammes plus « actives », le tout pouvant s'expliquer par une circulation de l'air favorisée par un conduit plus long et circulaire et des supports pour la cocotte plus grands que pour les autres dispositifs (3,0 contre 1,5 cm, et 1,0 cm pour le n°3) laissant ainsi s'échapper les fumées plus rapidement ainsi que la chaleur par convection.

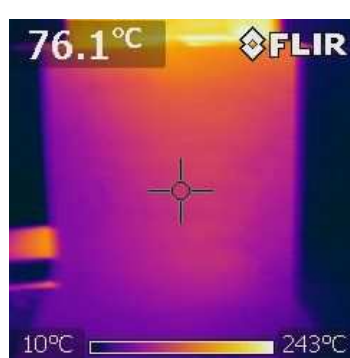
- Un conduit « parfaitement » isolé : C'est le cas également du modèle n°2. Cependant dans ce dernier, des briques réfractaires ont été utilisées et mettent un certain temps à monter en température contrairement à la vermiculite (ou la cendre) utilisée dans le modèle n°1 qui semblent former un meilleur isolant. Rappelons que le modèle n°2 avait été pensé aussi pour laisser mijoter les plats en fin de cuisson et chauffer la pièce dans laquelle il était entreposé en jouant sur le pouvoir réfractaire important des briques qui restituent lentement l'énergie emmagasinée à l'environnement. Mais, les briques rayonnant vers l'intérieur, la seconde chauffe nous a permis de voir que la consommation de bois et le temps de chauffe ont nettement diminué. Ils ne sont pas passés en dessous du modèle 1 car les briques rayonnent aussi dans la pièce comme le montre les images infrarouges ci-dessous, ce qui n'est pas le cas de la vermiculite.



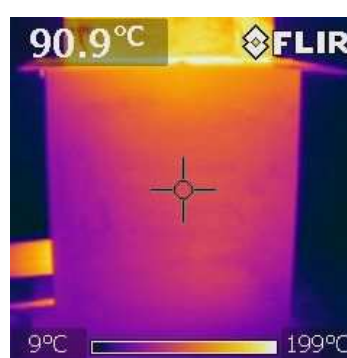
*Cuisneur n°1 à la fin de 2de chauffe
Température assez stable*



Cuisneur brique : 1ère Chauffe



Cuisneur brique : 2ème Chauffe



Cuisneur brique : 3ème Chauffe

- D'un point de vue consommation de bois et donc taux de conversion

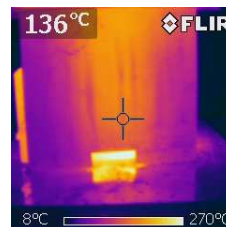
CUISEURS A BOIS ECONOMES	MODELE N°1		MODELE N°2 Cuisneur brique			MODELE N°3 Avec isolation	
	1ère chauffe	2de chauffe	1ère chauffe	2ème chauffe	3 ^{ème} ** chauffe	1ère chauffe	2ème chauffe
CONSUMMATION EN BOIS (en g)	410 ± 40	340 ± 40	470 ± 40	360 ± 30	300 ±40	410 ± 40	350 ± 30
TAUX DE CONVERSION (en kJ/g de bois)	3.5	4.2	3.0	3.9	4.7	3.5	4.1
Economie de bois par rapport à un 3 pierres	32%	43%	23%	40%	50%	32%	42%

Si le premier modèle est le plus puissant, il n'est pas le plus économe en bois ! En effet, le four brique le concurrence de 7 points, certes après une troisième chauffe donc plus de 30 min de fonctionnement. On constate même que le modèle 3 avec isolation et apport d'air chaud, parvient à ces performances voire même à faire mieux alors comme nous allons le montrer ensuite, celui-ci peut être largement amélioré. Ce qui a permis de le rendre plus puissant est probablement aussi ce qui le rend moins économe : la circulation d'air accrue permet en effet un feu plus vif entraînant une circulation des fumées trop rapide ce qui nous amène à supposer que les gaz s'échappent en étant moins brûlés mais également avec plus de perte de chaleur par « convection » puisque le débit d'air est plus important.

Concernant le modèle n°3, les résultats escomptés quant à l'amélioration liée à la double combustion ne sont pas tout à fait au rendez-vous. Il est fort probable qu'il n'y ait pas besoin d'autant d'arrivées d'air, qui plus est, en contact avec la tôle extérieure du cuiseur donc entraînent des zones non isolées avec de fortes pertes par conduction comme les images infrarouges ci-dessous le montrent, avec des coins isolés plus froids que les centres où sont les arrivées d'air. On constate d'ailleurs que l'isolation n'a pas grand effet dans l'amélioration des performances énergétiques.



Disposition de l'isolant et des arrivées d'air dans le modèle n°3



*Cuiseur n°3 isolé à la fin 2de chauffe
Température assez stable*

Suite à l'analyse de ces premiers résultats, il semble que puissance et économie de bois ne soient pas totalement compatibles dans notre dispositif.

2) Efficacité « écolo-sanitaire »

Le second objectif d'un CBE, adapté pour une utilisation domestique au Maroc, est de réduire la pollution et les risques sanitaires, afin d'améliorer les conditions de son utilisation pour les usagers.

Nous avons donc décidé d'analyser les fumées et notamment d'en mesurer le taux de monoxyde de carbone (CO) et le taux de particules fines qui sont nocifs pour la santé.

a) Monoxyde de carbone et mesures

En effet, concernant le monoxyde de carbone, il se fixe aux globules rouges et les empêche d'approvisionner les organes en dioxygène.

Le taux habituel de CO dans l'air est d'environ 0,2 ppm (partie par million). Cependant, une combustion incomplète donne lieu à un dégagement de CO important qui peut entraîner des intoxications plus ou moins fortes selon la concentration dans l'air et le temps d'exposition aux fumées. Ce n'est qu'au-delà de 200 ppm que les maux de tête, nausées et fatigue apparaissent. Dans la pièce où se situe une chaudière, ou tout autre dispositif fonctionnant à l'aide d'un combustible, il est courant que le taux de CO avoisine les 50 ppm.

Pour mesurer le taux de CO que dégage chacun de nos cuiseurs, ne trouvant pas de capteur scientifique à un coût raisonnable, nous avons décidé de fabriquer notre propre capteur à base d'une **sonde (CO MQ7 SEN0132) connectée à une carte de programmation arduino.**

Sonde CO : Capteur de CO MQ7 SEN0132

Référence site internet : <https://www.gotronic.fr/art-capteur-de-co-mq7-sen0132-22962.htm>

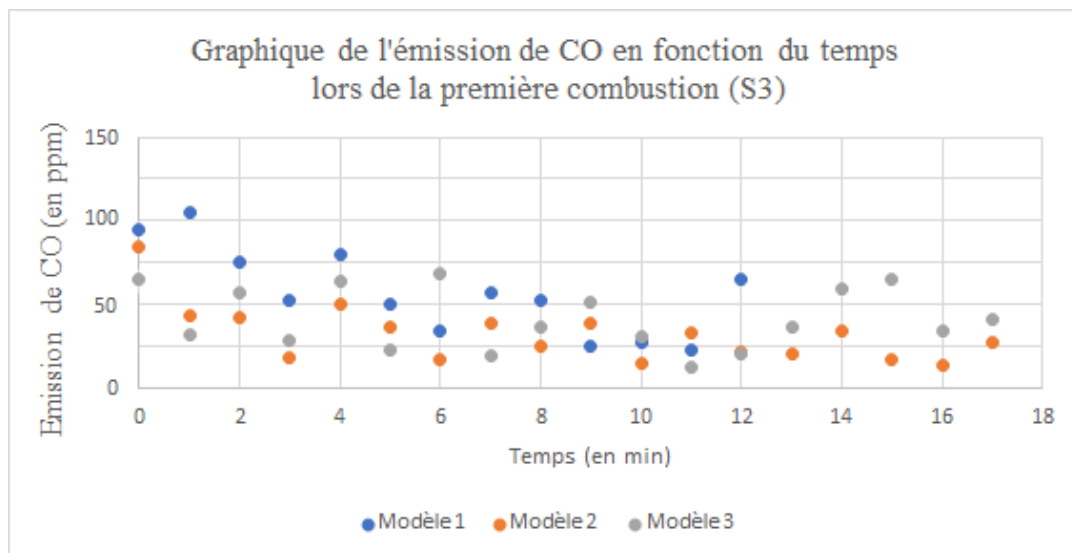
Module basé sur le capteur MQ7 permettant de détecter la présence de monoxyde de carbone CO de 20 à 2000 ppm. / Référence fabricant: **SEN0132**



Nous avons eu beaucoup de mal à trouver une entreprise en mesure d'étalonner notre dispositif. Nous avons enfin trouvé un partenaire fin janvier, l'entreprise Trescal, via son directeur général adjoint, qui nous a proposé de l'étalonner gratuitement. Cependant, le laboratoire en mesure de le faire est en Espagne, donc les délais, étaient trop courts pour que les résultats nous soient revenus avant le dépôt de ce dossier. Nous espérons avoir un retour pour la finale nationale.

Mesures du taux de monoxyde de carbone lors de nos expérimentations :

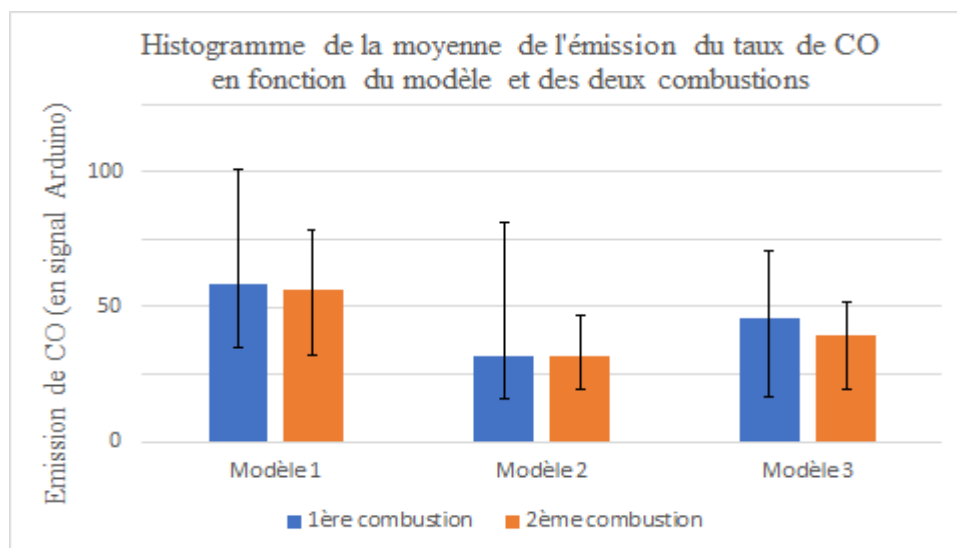
Comme nous pouvons le voir sur le graphique ci-dessous, les relevés faits avec notre capteur de monoxyde de carbone en ppm, varient énormément au cours du temps.



Ces courbes mettent clairement en évidence que l'émission de monoxyde de carbone à l'allumage est assez élevée tant que le bois n'est pas carbonisé et le cuiseur assez chaud pour atteindre 700-800°C et assurer la double combustion à savoir la combustion la plus complète possible des gaz qui s'échappent. Il est plus difficile d'identifier sur cette courbe les approvisionnements en bois qui génèrent a priori plus de fumées (particules imbrûlées) que de CO, le cuiseur étant déjà chaud.

Il semblerait que le taux de monoxyde de carbone dans la pièce où nous nous trouvons n'ait jamais dépassé 100 ppm ou seulement très légèrement avec le modèle n°1, donc qu'aucun de ces dispositifs ne présente de danger du point de vue de l'intoxication au CO.

Cependant, ce type de graphique étant difficile à interpréter pour comparer les différents modèles, nous avons donc effectué une moyenne de l'ensemble des valeurs de monoxyde de carbone mesurées au cours des deux combustions successives pour chaque cuiseur en y incluant les fluctuations (et non des barres d'erreurs) autour de cette moyenne qui sont tout de même importantes.



Premières conclusions sur les émissions de monoxyde de carbone :

- Le modèle de cuiseur qui nous avait semblé le plus puissant, avec un temps de chauffe fortement réduit et donc une puissance fournie plus grande mais parallèlement une

consommation de bois qui n'est pas la plus faible, s'avère être légèrement plus émetteur de CO. Nous avons déjà émis des doutes quant au tirage important que nous avons repéré, d'une part à cause d'une cheminée plus longue et d'autre part à cause de supports un peu hauts (3 cm) pour poser le plat laissant s'échapper alors les fumées très rapidement.

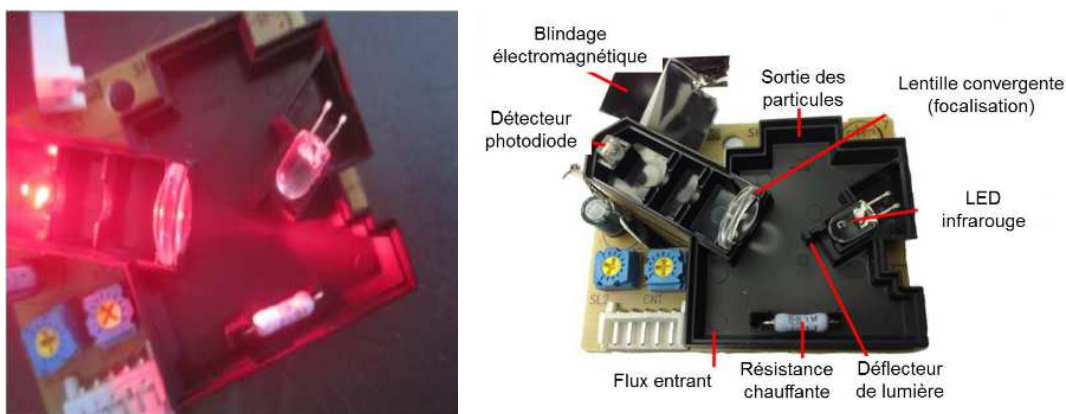
- Le modèle brique semble être moins émetteur avec tout de même de grandes variations autour de la moyenne comme le montrent les barres de fluctuation. Nous avons essayé de faire ces expériences toujours dans les mêmes conditions, en disposant les capteurs toujours au même endroit de la pièce. Mais d'un jour à l'autre, la ventilation de la pièce peut quelque peu bouger avec la variation de pression atmosphérique et températures intérieure et extérieure.

Quelle origine ? Est-ce dû à une température intérieure plus élevée, les briques jouant effectivement leur rôle à la seconde chauffe... Est-ce dû également aux supports plus petits, 1,5 cm contre 3 cm dans le cuiseur n°1 permettant de retenir les fumées ?

b) Particules fines et mesures

Étant donné que les fumées contiennent également d'autres composants dangereux pour la santé, nous avons cherché à analyser les poussières qui s'échappent des cuiseurs. Comme il était impossible de trouver un capteur performant à un coût raisonnable dans le commerce (location allant de 500 à 1000€), nous avons décidé de fabriquer notre propre capteur de poussières dans le but non pas de comparer les taux mesurés à des normes de pollution, mais de comparer les émissions des cuiseurs entre eux.

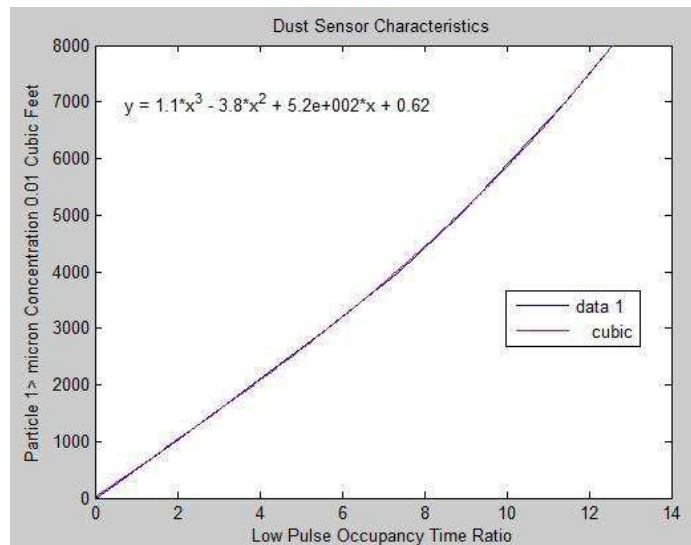
Nous avons choisi de travailler avec le capteur de microparticules PPD42NS (Evolva), au prix de 20€. Il permet de détecter des particules qui font de 1 à 10 μm de diamètre appelées PM10 et d'évaluer leur concentration. Il fonctionne jusqu'à un taux d'humidité dans l'air de 95% et de 0°C à 45°C. C'est pourquoi nous avons dû être très vigilants lors de nos expériences, car nos fours montent à des températures nettement supérieures. La circulation de l'air dans le capteur se fait grâce à la résistance chauffante qui permet des mouvements de convection.



Photos du capteur en fonctionnement et de ses différents composants

A droite : composants du capteur de microparticules. À gauche : la photo permet de visualiser le point focal de la lentille convergente. Une LED rouge est positionnée à la place du photodétecteur et de la fumée artificielle est pulvérisée afin d'observer le cône de lumière. En utilisant le principe du retour inverse de la lumière, le faisceau est bien focalisé au niveau du photodétecteur.

En présence de microparticules, le flux lumineux reçu par la photodiode varie. Le temps pendant lequel l'intensité lumineuse est inférieure à une valeur seuil appelé Low Pulse Occupancy Time (LPOT) est mesuré, puis le rapport LPOT/temps d'échantillonnage (=5 s) appelé, ratio, est calculé et ensuite converti en nombre de particules par unité de volume (pcs : 1 particule/238 mL=0,01 cf avec cf= 1 cubic feet) en utilisant une courbe de calibration fournie par le constructeur donnée ci-contre.



Modélisation de la concentration particulaire en fonction du ratio

Nous commandons le capteur grâce à un microcontrôleur Arduino UNO. L'extrait de code ci-dessous montre comment nous avons calculé les valeurs de concentrations particulaires. Nous avons décidé de faire apparaître la concentration *en PM10* directement sur un écran LCD mais aussi d'enregistrer récemment les valeurs sur une carte micro SD pour un meilleur traitement.

Extrait du programme permettant de calculer la concentration particulaire :

```
// Calcul de la concentration
ratio = lowpulseoccupancy / (sampletime_ms * 10.0);
concentration = (1.1 * pow(ratio, 3) - 3.8 * pow(ratio, 2) + 520 * ratio + 0.62)/0.283;
// en particules /L avec 0,01 pied cubic = 0,283L
```

Remarque : On notera que quand l'affichage est 0,62, cela correspond à une mesure nulle.

Nos premières mesures :

Une chose est certaine, les CBE génèrent moins de fumées et gaz toxiques que les dispositifs traditionnels mais il n'en demeure pas moins qu'il reste des émissions nocives et nous répèterons au Maroc que leur utilisation est préférable en extérieur ou le cas échéant dans une pièce très ventilée. Pour les besoins de l'expérience et pour coller au plus près de la réalité, nous avons réalisé ces mesures dans une remise légèrement ventilée par deux ouvertures.

Dans un premier temps, l'allumage du feu et son approvisionnement en bois dans des proportions moindres tout de même, sont des moments qui vont générer des fumées quel que soit le cuiseur. Si nous avons à retenir un conseil pour les futures utilisatrices des ces cuiseurs que nous rencontrerons, ce dispositif ayant l'avantage d'être amovible par rapport à ce qu'elles peuvent déjà avoir,

Séchage 100°C	Évaporation et élimination de l'eau contenue dans le bois  Fumées
Début de la combustion 250°C	Décomposition du bois sous l'effet de la chaleur : • libération des composés gazeux (vapeur d'eau, gaz combustibles); • formation de charbon de bois (composé principalement de carbone C).  Fumées
Apparition des flammes	Point d'auto-inflammation de certains gaz combustibles (début de l'oxydation), en présence d'oxygène.  Fumées
Gazéification du carbone	Transformation du charbon en gaz combustibles riches en hydrogène (H) et en monoxyde de carbone (CO)  Fumées
Oxydation complète des gaz combustibles 800°C	Transformation des gaz combustibles en dioxyde de carbone (CO ₂), vapeur d'eau (H ₂ O) et oxydes d'azote (NOX), en présence d'oxygène. Restent les cendres.

La combustion du bois (Source : BISS)

l'allumage est préférable en extérieur le temps que le bois carbonise. En effet, la combustion du bois se fait en plusieurs étapes. Certes, la réaction chimique mise en œuvre dans un feu de bois est une combustion. Cependant le bois ne brûlant pas directement, la combustion à proprement parler ne se produit qu'après une série d'étapes intermédiaires rappelées ci-dessus.

Relevés de particules dans les fumées :

Comme le préconisait le test AWBT, nous avons placé le capteur de particules dans les fumées, à 1,0 m de la cocotte pour juger de la combustion plus ou moins aboutie dans le modèle étudié (sachant qu'il ne peut fonctionner avec des températures dépassant 45°C).

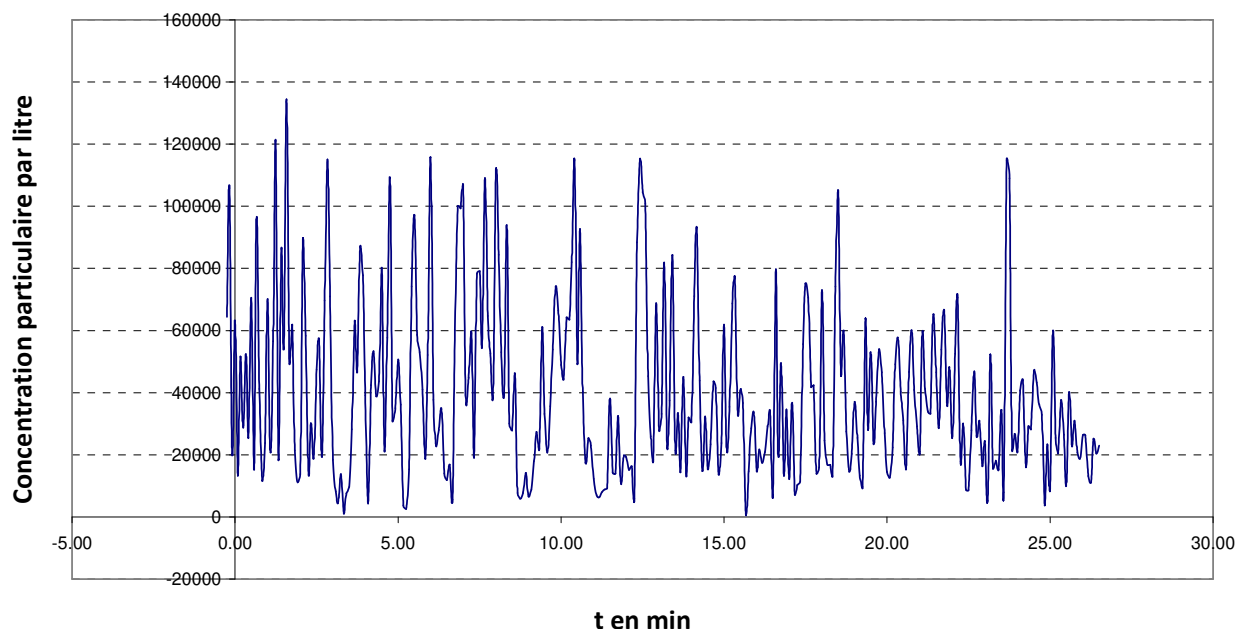


Cuiseurs en fonctionnement dégageant plus ou moins de fumées

Observations et mesures : Nous avons constaté visuellement à chaque expérience, que le modèle n°1 avait tendance à dégager un peu plus de fumées avec un débit plus important. Concernant le modèle n°2, dit cuiseur brique, il nous a semblé dégager moins de fumées notamment à chaud. Pour le cuiseur n°3 avec isolation et entrées d'air libres, il a semblé se situer entre les deux premiers modèles avec beaucoup de réserve.

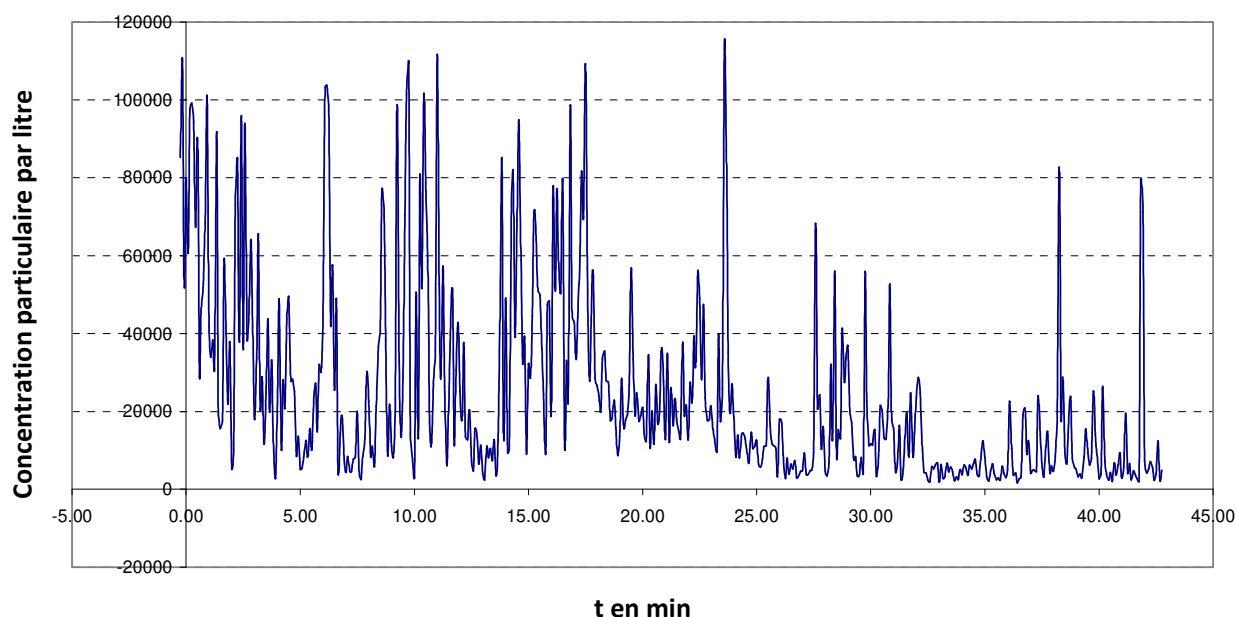
Ensuite, les mesures du taux de particules que nous avons relevées grâce à notre capteur de poussières, nous ont donné les graphiques suivants avec toutes les réserves dont nous avons déjà fait part quant à la disposition du capteur dans les fumées.

Taux de particules PM10 au cours du temps
Cuiseur n°1



Nous constatons que les mesures fluctuent énormément, les fumées ayant des trajets parfois perturbés par la ventilation de la pièce. Nous remarquons sur ces graphiques des variations brutales du taux de particules qui correspondent au moment où nous ajoutons du bois : il faut un certain temps pour que ce dernier se déshydrate totalement et carbonise. Des morceaux de bois de diamètre plus gros auraient permis d'ajouter du bois moins souvent donc de générer moins de fumées.

Taux de particules PM10 au cours du temps Cuiseur n°2 - Cuiseur brique



Pour le modèle n°1, les pics sont légèrement plus élevés que pour le modèle n°2 et de même lorsque les fumées se calment entre deux ajouts de bois, on constate que les émissions de particules fines sont 2 à 3 fois plus faibles (2500 particules par litre contre 6000) avec le modèle n°2. Nous avons également noté qu'au fur et à mesure que le four chauffe, les émissions durent moins longtemps après chaque ajout et ont tendance à être moins fortes. Pour le modèle n°3 avec isolation, nous avons observé des minima proches du modèle 1.

En conclusion, le cuisEUR n°1 semble être le moins respectueux de la santé de ses utilisatrices, alors que le n°2 le plus. Mais rappelons que ces résultats doivent être pris avec beaucoup de méfiance même si nous avons pris un certain nombre de précautions lors de nos manipulations, à savoir ne pas changer le capteur de place entre les expérimentations, tester les cuisEURS les uns à la suite des autres, le même jour, pour être dans des conditions extérieures proches, ...

Notre nouveau partenaire, la société Trescal nous a mis en contact avec l'un de ces laboratoires situé à Toulon auquel nous avons pu envoyer notre dispositif. Les résultats sont plus que décevants, voici les commentaires du technicien qui a tenté de l'étalonner :

« Voici les résultats que j'ai obtenus sur les mesures comparatives entre les compteurs de particules PPD42NS (Evolva) et notre compteur de particules étalon TSI 9306-03 :

- *Les liaisons entre le module de commande et le compteur de particule présentent de nombreux faux contacts, ce qui a perturbé les prises de mesure et le comptage particulaire.*
- *Comme le compteur PPD42NS ne possède pas de pompe, j'ai fait passer le flux de comptage de notre compteur étalon par le chemin défini dans le dossier du projet. J'ai obstrué toutes prises d'air ne faisant pas parti de notre flux de comptage. Les résultats obtenus ne nous permettent pas de délivrer un relevé de mesure. »*

Nous nous sommes procuré un autre capteur, NOVAPM SDS 011, que nous avons testé sur les différents cuisEURS. Avant de mettre en forme les résultats obtenus, nous l'avons envoyé au laboratoire de Toulon pour étalonnage. Nous devrions le récupérer début avril.

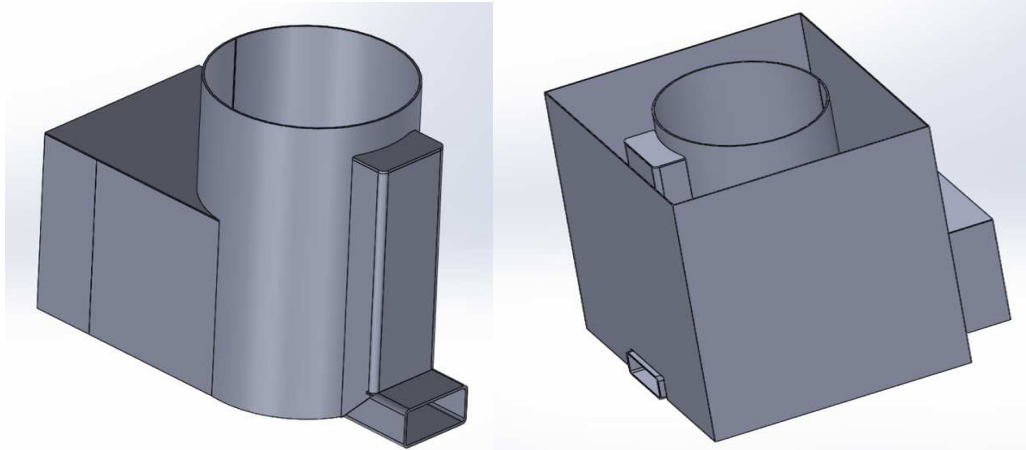


Capteur NOVAPM SDS 011

B- Un nouveau modèle plus efficace ?

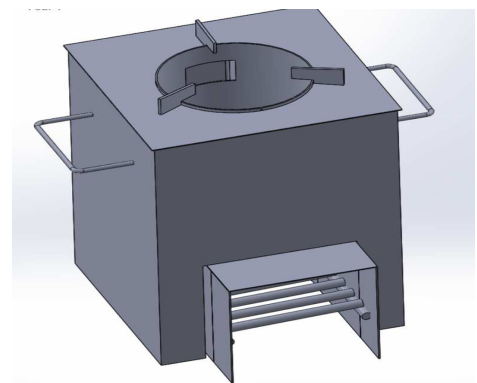
1) Plans d'un nouveau modèle

- Une seule entrée d'air, moins large que celle dans le modèle 3, de plus, collée à la cheminée sans toucher les parois extérieures pour optimiser le réchauffement de l'air apporté au-dessus des flammes. Elle limite aussi les pertes par conduction vers les parois extérieures du four et ensuite par rayonnement et convection une fois que celles-ci sont chaudes ;



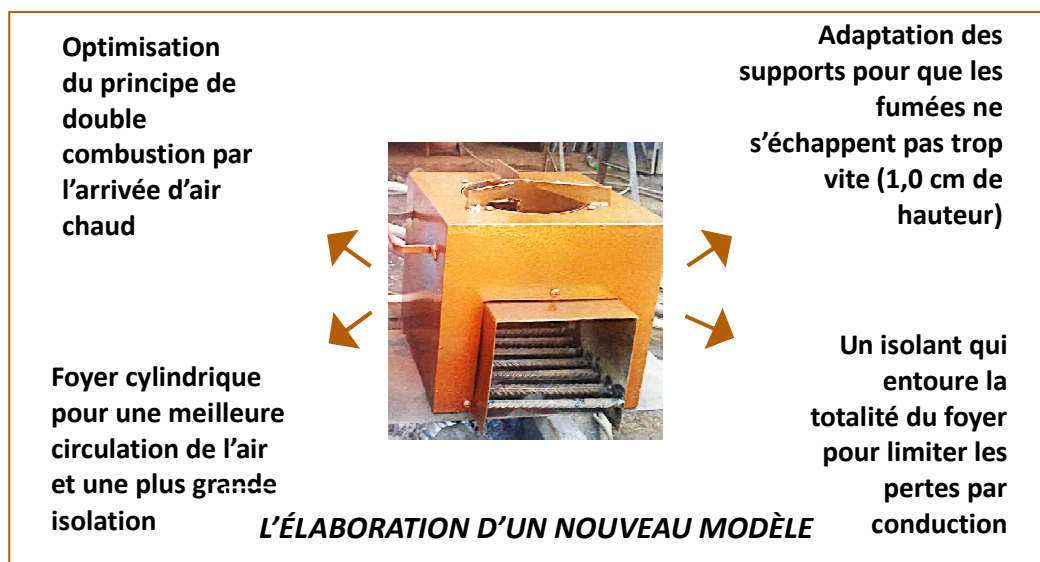
Une seule arrivée d'air accolée au foyer Arrivée d'air sans contact avec la paroi extérieure

- Un foyer cylindrique comme dans le premier modèle pour une meilleure circulation de l'air et des angles mieux isolés pour favoriser la combustion complète ;
- Des barreaux en métal d'un cm de haut et non de 3 cm comme sur le modèle 1 pour limiter la vitesse d'échappement des fumées et probablement optimiser la combustion complète.
- Une petite casquette sur l'arrivée d'air au niveau des flammes pour que ce dernier ne s'échappe pas trop rapidement (non visible sur le dernier schéma).



Pour respecter nos critères de durabilité du produit, de facilité de construction par les forgerons et de coût minimisé, ce four a :

- Une forme parallélépipédique pour une construction simple et rapide ;
- Une tôle épaisse pour sa résistance dans le temps.



2) Efficacité « écolo-énergétique »

Nous avons renouvelé nos expériences dans les mêmes conditions avec le même bois, le même volume d'eau à faire bouillir... et des températures extérieures proches.

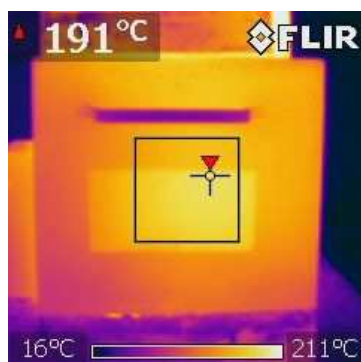
CUISEURS A BOIS ECONOMES	Ciseur 2.0 sans isolant		Ciseur 2.0 avec isolant		Ciseur 2.0* Sans arrivée d'air
	1ère chauffe	2de chauffe	1ère chauffe	2ème chauffe	3ème chauffe avec isolant
Nombre de tests	3	3	8	8	2
TEMPS MOYEN D'EBULLITION (en min)	18 ±2	15 ±2	14 ±2	12 ±1	13 ±...
PUISSANCE (en kW)	1.3	1.6	1.7	2.0	1.8
CONSOMMATION EN BOIS (en g)	420 ±50	350 ±30	390 ±50	290 ±30	350 ± ...
TAUX DE CONVERSION (en kJ/g de bois)	3,4	4,1	3,6	4.9	4,1
Economie de bois /« 3 pierres »	30%	42%	35%	52%	42%

* : Lors de nos expériences, nous avons réalisé à la suite de la 2^{ème} chauffe avec isolant, une troisième en obstruant l'arrivée d'air secondaire avec de l'aluminium et un adhésif haute température.

Analyses des résultats :

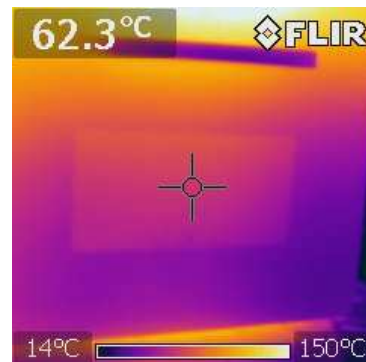
Comparons, dans un premier temps, les différentes expériences réalisées sur ce modèle :

- L'isolation joue son rôle dans ce dispositif comme on peut le voir à travers ces résultats : la consommation de bois étant diminuée de 10 points en moyenne par rapport à un ciseur traditionnel, sur les 3 tests réalisés, passant d'une moyenne de 350 g à 290 g au cours de la 2de chauffe, le temps de chauffe se voyant lui aussi fortement diminué (environ 25% en prenant la 2de chauffe sans isolation comme référence). On peut voir également sur ces photos infrarouges avec et sans isolation lors de la 2^{ème} chauffe, que la température de l'enveloppe extérieure est nettement diminuée et il est même possible de prendre le ciseur par ses poignées sans risque de brûlures.



A la fin de la seconde chauffe,

Sans isolation



Avec isolation

- Pour ce qui est de l'arrivée d'air chaud, une fois obstruée, nous avons chaque fois constaté une augmentation de la consommation de bois mais avec des variations assez importantes, soit une diminution de 15 et 20% due à cette arrivée d'air en temps et en bois en prenant le dispositif isolé sans arrivée d'air comme référence. Les essais auraient besoin d'être renouvelés...

Comparons maintenant avec les précédents modèles de BISS possédant une isolation :

CUISEURS A BOIS ECONOMES	MODELE N°1		MODELE N°2 Cuiseur brique			MODELE N°3 Avec isolation		Cuiseur 2.0 avec isolant	
	1ère chauffe	2de chauffe	1ère chauffe	2ème chauffe	3ème chauffe	1ère chauffe	2ème chauffe	1ère chauffe	2ème chauffe
TEMPS MOYEN D'EBULLITION (en min)	15 ±2	12 ±1	21 ±1	17 ±1	15 ±1	16 ±1	14 ±1	14 ±2	12 ±1
PUISSANCE (en kW)	1.6	2.0	1.1	1.4	1.6	1.5	1.7	1.8	2.2
CONSOMMATION EN BOIS (en g)	410 ± 40	340 ± 40	470 ± 50	360 ± 30	300 ±40	410 ± 40	350 ± 30	390 ±50	290 ±30
TAUX DE CONVERSION (en kJ/g de bois)	3.5	4.2	3.0	3.9	4.7	3.5	4.1	3,8	5,1
Economie de bois par rapport à un 3 pierres	32%	43%	23%	40%	50%	32%	42%	38%	53%

Il semble que ce modèle ait atteint ses objectifs

- en ayant une puissance de 2,0 kW équivalente au plus puissant des modèles mis à notre disposition,
- en gagnant 10 à 13 points par rapport à chacun sur l'économie de bois par rapport au cuisleur trois pierres au cours de la 2ème chauffe.

Le temps de chauffe se trouvent diminué et donc la puissance apportée augmente, les pertes sont minimisées et la combustion plus poussée probablement grâce :

- Au choix de l'isolant par rapport au cuisleur 2,
- Au fait que l'isolant entoure totalement le foyer par rapport au cuisleur 3
- Aux supports plus petits par rapport au cuisleur 1 ne laissant pas les fumées s'échapper aussi facilement (1,0 cm contre 3,0 cm pour le cuisleur n°1)
- Enfin, à la proximité entre les flammes et la cocotte par rapport aux modèles 1 et 2.

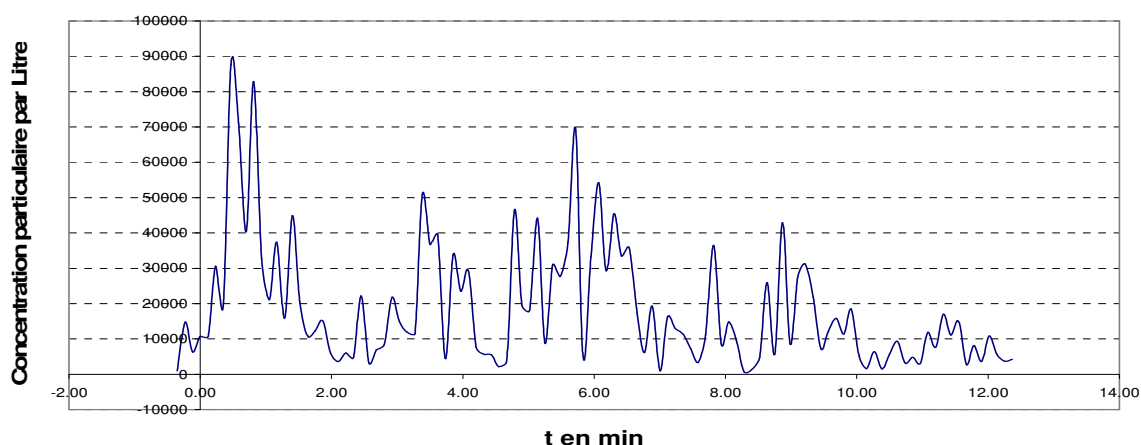
De nombreux critères ont été modifiés simultanément car il est difficile de faire fabriquer des modèles différents en France à un coût raisonnable, devis supérieur à 200€. Nous les avons donc fait fabriquer au Maroc pour 17€ mais il a fallu les rapporter par avion...

3) Efficacité « écolo-sanitaire » (Mesures en cours)

a) Mesures du taux de particules fines

Concernant le taux de monoxyde de carbone, la moyenne enregistrée est de 29 ppm soit de l'ordre de celle obtenue avec le modèle n°2, ou cuiseur brique donc assez basse par rapport aux autres modèles de BISS. Le résultat le plus intéressant est celui lié aux fumées. Comme les autres fours, à l'allumage, les fumées sont incontournables car le cuiseur est froid mais rapidement ces dernières deviennent négligeables et à peine perceptibles comme nous l'avons remarqué avec le four brique après 2 chauffe. Sur le graphique ci-dessous représentant la 2^{de} chauffe, nous remarquons des pics nettement moins hauts mais notons que cette expérience a été réalisée 3 mois après celles sur les modèles de BISS et que notre dispositif est loin de donner des mesures fiables selon son étalonnage par la société Trescal.

**Taux de particules PM10 au cours du temps
Cuiseur 2.0 isolé**



b) Mesures de température au cœur du foyer

L'enjeu majeur dans un CBE est d'atteindre une température de 700 à 800°C pour optimiser la combustion et par la même diminuer la toxicité des fumées. Pour contourner le problème de la mesure de la toxicité des fumées avec des capteurs non fiables, nous avons décidé de nous procurer une sonde haute température comme celle utilisée par les chauffagistes pour aller mesurer la température au cœur du foyer ou température de flamme.

La sonde de température que nous nous sommes procurés dernièrement sur les conseils de la société Trescal, de type K de chez Chauvin Arnoux peut mesurer des températures allant de 2.5°C à 1100°C à l'aide d'un thermo couple. Selon l'étalonnage d'usine, elle fournit une température avec une incertitude de 2,5°C. Nous n'avons pas tenu compte de cette erreur de type B, compte tenu des fluctuations observées, l'intensité du feu variant très rapidement selon l'avancement de combustion des morceaux de bois.

Les résultats que nous avons obtenus en mesurant la température toujours dans les mêmes conditions, feu vif avec bois carbonisé sont consignés dans le tableau ci-dessous.

CUISEURS A BOIS ECONOMES	MODELE N°1		MODELE N°2 Cuiseur brique			MODELE N°3 Avec isolation		Cuiseur 2.0 avec isolant	
	1ère chauffe	2de chauffe	1ère chauffe	2ème chauffe	3ème chauffe	1ère chauffe	2ème chauffe	1ère chauffe	2ème chauffe
Température de flamme (en °C)	740±30	780±40	500±50	620±50	720±30	570±30	670±30	750±30	810±40

Les mesures de température au cœur du foyer viennent cependant confirmer une combustion qui serait plus complète avec des températures atteintes au cœur du foyer plus élevées dans le Cuiseur 2.0 que pour les trois modèles mis à disposition par BISS.

CONCLUSION

Notre objectif était de faire un choix de Cuiseur à Bois Économe pour le village de Tizi N'Oucheg et nous y sommes parvenus. Certes au départ, nous pensions le faire parmi les différents modèles développés et mis à notre disposition par BISS. Cependant, constatant que le plus puissant n'était pas nécessairement le plus écologique, après avoir essayé de dégager les raisons de ces observations liées à leur conception, nous nous sommes lancés dans la modélisation de notre propre CBE tenant comptes des coutumes et savoir-faire locaux. Nous l'avons proposé à BISS qui l'a validé en mars 2019. Les tests réalisés sur le prototype entre mai et aujourd'hui encore, se révèlent plutôt satisfaisants avec une diminution de 10-12 points en consommation en bois (relativement aux dispositifs traditionnels) avec une puissance voisine du plus puissant des cuiseurs mis à notre disposition. Comme nous l'avons déjà dit, ces mesures nécessitent beaucoup de réserve car très difficiles à reproduire à l'identique donnant donc lieu à des incertitudes importantes. Concernant les analyses des particules et gaz rejetés, nous les poursuivons, les capteurs mis au point étant plus ou moins fiables d'après notre partenaire.

Quoi qu'il en soit, une commande a été passée en août 2019 à un forgeron marocain pour fabriquer les 110 premiers modèles à partir des matières premières locales. La distribution de ces dispositifs a été un moment de partage fort dont nous nous souviendrons à jamais. L'engouement des femmes, leur accueil exceptionnel, ont dépassé toutes nos espérances. Les tests réalisés dans les habitations ont surpris les utilisatrices par leur faible consommation en bois et le peu de fumées dégagées excepté bien sûr à l'allumage. C'est ainsi que suite aux bons échos des habitants de Tizi N'Oucheg, les autres villages de la tribu de Oucheg nous ont demandé de les équiper également en Cuiseurs 2.0! Prochain objectif : 400 foyers...avant la fin de l'année 2020.

BIBLIOGRAPHIE

BOLIVIA INTI. Présentation de l'association. <http://www.boliviainiti-sudsoleil.org/>

COMBUSTION:

- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Combustible>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Combustion>
- <http://tpe-bioluminescence.e-monsite.com/pages/b-etat-excite-d-un-atome-et-emission-d-un-photon.html>

COMBUSTION DU BOIS:

- <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/le-bois-une-source-d-energie-thermique>
- <https://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16667#c20381+c20382+c20380>
- <https://tice.ac-montpellier.fr/ABCDORGA/Famille/CHIMIEDUBOIS.html>
- **THESE :**
[Pyrolysis-Gas Chromatography/Mass Spectrometry Analysis of Di and Triterpenoids by University of Jyväskylä, Department of Chemistry, Laboratory of Applied Chemistry, 13.01.2017, Francesca Renzi](#)

DOUBLE COMBUSTION:

- <http://www.chauffage-a-bois.fr/double-combustion-du-bois/>
- <https://www.aasgard.fr/blog/double-combustion-definition/>
- <https://www.cheminees-axis.com/la-double-combustion/>
- <https://www.chauffageaubs.eu/comment-pourquoi-obtenir-double-combustion/>
- <https://www.laprimenergie.fr/les-travaux/le-poele/le-poele-double-combustion>

THERMODYNAMIQUE:

- **définition:** <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/thermodynamique/97026>

ECOLOGIE ET ENVIRONNEMENT

- **ACTU - ENVIRONNEMENT.** Gaz à effet de serre (GES), 2018,
https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/gaz_a_effet_de_serre_ges.php4

ANNEXE 1

Carnet d'expériences

Résultats Modèle n°1

1ère Chauffe

essai	Jours	Horaire	temps (min)	masse_bois(g)	Puissance (kW)	T (kJ/g)
1	17/12/2018	16h30	14,5	450	1,6	3,2
2	19/12/2018	14h00	14	425	1,7	3,3
3	16/01/2019	14h00	15,5	430	1,5	3,3
4	23/01/2019	14h00	13,5	390	1,8	3,6
5	23/12/2019	15h00	16	390	1,480416667	3,6
6	27/12/2019	15h00	15,5	400	1,528172043	3,6
Moyenne			15	414	1,6	3,4
écartype			0,98	25	0,11	0,20
incertitude de répétabilité			1,1	27	0,1	0,2
incertitude de mesure				20		
incertitude globale				33		

2de Chauffe

essai	Jours	Horaire	temps (min)	masse_bois(g)	Puissance (kW)	T (kJ/g)
1	17/12/2018	16h45	12	350	2,0	4,1
2	19/12/2018	14h15	11	320	2,2	4,4
3	09/01/2019	14h15	13	370	1,8	3,8
4	16/01/2018	14h00	12,5	350	1,9	4,1
5	23/01/2019	14h00	13	360	1,8	3,9
6	23/12/2019	15h15	12	320	2,0	4,4
7	27/12/2019	15h15	11,5	330	2,1	4,3
Moyenne			12,1	343	2,0	4,2
écartype			0,75	20	0,1	0,2
incertitude de répétabilité			0,9	25	0,2	0,3
incertitude de mesure				20		
incertitude globale				32		

Résultats Modèle n°2

1ère Chauffe

essai	Jours	Horaire	temps (min)	masse_bois(g)	Puissance (kW)	T (kJ/g)
1	19/12/2018	15h00	21	490	1,1	2,9
2	09/01/2019	15h00	19	450	1,2	3,2
3	16/01/2018	15h00	20	430	1,2	3,3
4	23/01/2019	15h00	20,5	480	1,2	3,0
5	23/12/2019	16h00	22	470	1,1	3,0
6	26/12/2019	16h00	21	480	1,1	3,0
Moyenne			21	467	1,2	3,1
écartype			1,0	23	0,1	0,2
incertitude de répétabilité			1,1	25	0,1	0,2
incertitude de mesure				20		
incertitude globale				32		

2ème Chauffe

essai	Jours	Horaire	temps (min)	masse_bois(g)	Puissance (kW)	T (kJ/g)
1	19/12/2018	15h25	18	380	1,3	3,7
2	09/01/2019	15h25	16,5	365	1,4	3,9
3	16/01/2018	15h25	17	350	1,4	4,1
4	23/01/2019	15h25	17	345	1,4	4,1
5	23/12/2019	16h20	18	370	1,3	3,8
6	26/12/2019	16h20	16,5	370	1,435555556	3,8
Moyenne			17,1666667	363	1,4	3,9
écartype			0,67	12	0,0	0,1
incertitude de répétabilité			0,9	16	0,1	0,2
incertitude de mesure				20		
incertitude globale				25		

Résultats Modèle n°3 Isolé

1ère Chauffe

essai	Jours	Horaire	temps (min)	masse_bois(g)	Puissance (kW)	T (kJ/g)
1	19/12/2018	16h00	17	430	1,4	3,3
2	09/01/2019	16h00	15	380	1,6	3,7
3	16/01/2018	16h00	16	390	1,5	3,6
4	23/01/2019	16h00	15	410	1,6	3,5
5	23/12/2019	17h00	16	430	1,5	3,3
6						
Moyenne			16	408	1,5	3,5
écartype			0,84	23	0,1	0,2
incertitude de répétabilité			1,0	28	0,1	0,2
incertitude de mesure				20		
incertitude globale				35		

2ème Chauffe

essai	Jours	Horaire	temps (min)	masse_bois(g)	Puissance (kW)	T (kJ/g)
1	19/12/2018	16h15	15	370	1,6	3,7
2	09/01/2019	16h15	14	355	1,7	3,9
3	16/01/2018	16h15	13,5	345	1,8	4,1
4	23/01/2019	16h15	14	350	1,7	4,1
5	23/12/2020	17h15	14,5	340	1,6	3,9
6	23/12/2019	17h30	15	360	1,6	3,8
Moyenne			14,3	350	1,7	4,0
écartype			0,61	11	0,1	0,1
incertitude de répétabilité			0,7	12	0,1	0,2
incertitude de mesure				20		
incertitude globale				23		

3ème Chauffe sans arrivée air

essai	Jours	Horaire	temps (min)	masse_bois(g)	Puissance (kW)	T (kJ/g)
1	16/01/2018	16h30	15	395	1,6	3,6
2	23/01/2019	16h30	14,5	370	1,6	3,8
Moyenne			14,75	382,5	1,6	3,7
écartype			0,35	17,68	0,04	0,17
incertitude de répétabilité			3,18	158,75		
incertitude de mesure				20		
incertitude globale				160		

Résultats Cuiseur2.0 Isolé

1ère Chauffe

essai	Jours	Horaire	temps (min)	masse_bois(g)	Puissance (kW)	T (kJ/g)
1	15/05/2019	14h00	13	390	1,8	3,6
2	03/11/2019	14h00	14	370	1,7	3,8
3	09/11/2019	14h00	12	360	2,0	3,9
4	24/12/2019	14h00	14	400		
5	26/12/2019	14h00	13,5	400		
6	26/12/2019	14h00	15	410		
Moyenne			14	388	1,8	3,8
écartype			1,02	19		
incertitude de répétabilité			1,1	21,2		
incertitude de mesure				20		
incertitude globale				29		

2ème Chauffe

essai	Jours	Horaire	temps (min)	masse_bois(g)	Puissance (kW)	T (kJ/g)
1	15/05/2019	14h15	12	300	2,0	4,7
2	03/11/2019	14h15	11	270	2,2	5,3
3	09/11/2019	14h15	10	260	2,4	5,5
4	24/12/2019	14h15	12,5	280	1,9	5,1
5	24/12/2019	14h30	12	290	2,0	4,9
6	26/12/2019	14h15	12	300	2,0	4,7
7	26/12/2019	14h30	13	300	1,8	4,7
8	26/12/2019	14h45	12	290	2,0	4,9
Moyenne			12	286	2,0	5,0
écartype			1	15	0,2	0,3
incertitude de répétabilité			0,8	13	0,1	0,2
incertitude de mesure				20		
incertitude globale				24		

3ème Chauffe sans arrivée air

essai	Jours	Horaire	temps (min)	masse_bois(g)	Puissance (kW)	T (kJ/g)
1	03/11/2019	14h30	13	365	1,8	3,9
2	09/11/2019	14h30	12,5	340	1,9	4,2
Moyenne			13	353	1,9	4,0

ANNEXE 2

Programme Arduino pour le capteur de CO

Présentation du programme arduino - capture d'écran : mesure du CO

```
void setup()
{
Serial.begin(9600); //Set serial baud rate to 9600 bps
pinMode(8,INPUT);
pinMode(LED_BUILTIN,OUTPUT);
}
void loop()
{
int val;
int limit;
val=analogRead(0);//Read Gas value from analog 0
limit=digitalRead(8);
Serial.print("Co value =");
Serial.println(val,DEC);//Print the value to serial port
Serial.print("Limit: ");
Serial.println(limit);
digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
delay(500);
digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
delay(500);
}
```