



CAHIER TECHNIQUE N° 3

# Mesure des caractéristiques physico-chimiques des combustibles domestiques solides

Protocoles de mesures développés dans le cadre du projet Typha

*Ce projet a été financé par l'Union européenne et l'APAUS, et mis en œuvre par le Gret, le Parc national de Diawling et l'Institut supérieur d'enseignement technologique de Rosso, entre septembre 2011 et avril 2016.*

PROJET MIS EN ŒUVRE  
EN PARTENARIAT AVEC :



CAHIER TECHNIQUE

# Mesure des caractéristiques physico-chimiques des combustibles domestiques solides

---

Cahier technique réalisé dans le cadre du projet Typha.

---

**Ce projet a été financé par l'Union européenne et l'APAUS, et mis en œuvre par le Gret, le Parc national de Diawling et l'Institut supérieur d'enseignement technologique de Rosso, entre septembre 2011 et avril 2016.**

Ce document présente les protocoles utilisés dans le cadre du projet Typha pour mesurer les caractéristiques physico-chimiques de combustibles domestiques solides. L'objectif de ces protocoles est de pouvoir mener des mesures avec une rigueur scientifique suffisante afin de comparer des combustibles existants, comme le charbon de bois, avec les charbons produits dans le cadre du projet Typha

Le projet Typha est mis en œuvre par le Gret, l'Iset de Rosso et le Parc national du Diawling.



- Fondé en 1976, **le Gret** est une ONG internationale de développement, de droit français, qui agit du terrain au politique, pour lutter contre la pauvreté et les inégalités. Ses 700 professionnels interviennent sur une palette de thématiques afin d'apporter des réponses durables et innovantes pour le développement solidaire. [www.gret.org](http://www.gret.org)
- **L'Institut supérieur d'enseignement technologique (Iset de Rosso)** est un établissement public d'enseignement supérieur et de recherche créé en 2009. Il a pour missions la formation, la recherche et la vulgarisation dans les domaines agricole, pastoral et agroalimentaire. [www.iset.mr](http://www.iset.mr)
- **Le Parc national du Diawling (PND)** est un établissement public administratif créé en 1991 qui a pour objectifs la conservation et l'utilisation durable d'un échantillon de l'écosystème du bas Delta mauritanien, le développement harmonieux et permanent des activités traditionnelles des populations locales, et la coordination des activités pastorales et piscicoles menées sur son terrain. [www.pnd.mr](http://www.pnd.mr)

Avec le soutien financier de :

- l'Union européenne ;
- l'APAUS (Agence de promotion de l'accès universel aux services).



La présente publication a été élaborée avec l'aide de l'Union européenne et de l'Apas.  
Le contenu de la publication relève de la seule responsabilité du Gret et ne peut aucunement être considéré comme étant le point de vue de l'Union européenne et de l'Apas.

---

**Référence bibliographique pour citation :** Babana Ould Mohamed Lemine, Benjamin Trouilleux, Kevin Doussan, *Guide de mesure des caractéristiques physico-chimiques des combustibles domestiques solides*, Paris, Gret et Iset de Rosso, avril 2016, 25 p.

**Crédits photos :** © Gret

## Sommaire

<b>I. Avant propos.....</b>	<b>4</b>
<b>II. Pouvoir calorifique .....</b>	<b>5</b>
<b>III. Humidité.....</b>	<b>9</b>
<b>IV. Solidité .....</b>	<b>11</b>
<b>V. Masse volumique.....</b>	<b>12</b>
<b>VI. Masse volumique apparente .....</b>	<b>13</b>
<b>VII. Facilite d'allumage.....</b>	<b>14</b>
<b>VIII. Taux de cendres.....</b>	<b>15</b>
<b>IX. Test d'ébullition de l'eau (TEE).....</b>	<b>17</b>
<b>X. Test de cuisine comparée (TCC).....</b>	<b>21</b>
<b>XI. Bibliographie.....</b>	<b>25</b>

## I. AVANT PROPOS

---

Le projet Typha vise à développer un charbon à partir de la plante *Typha australis* afin de remplacer le charbon de bois. Des protocoles de mesures en laboratoire ont été définis afin d'aider au développement d'un combustible domestique alternatif de qualité.

La connaissance des caractéristiques des combustibles domestiques solides relève de trois nécessités :

1. S'assurer du respect du cahier des charges lors de leur production ;
2. S'assurer de la mise sur le marché de produits répondants aux usages et habitudes des utilisatrices ;
3. Aider au positionnement du combustible sur le marché en fonction de ses forces et faiblesses.

Les caractéristiques des combustibles concernées par les protocoles sont :

- le pouvoir calorifique
- l'humidité
- la solidité
- la masse volumique
- La masse volumique apparente
- la facilité d'allumage
- le taux de cendres
- le temps d'ébullition de l'eau et l'efficacité énergétique
- la capacité à cuisiner le plat national dans de bonnes conditions
- la composition des fumées

Il est recommandé de réaliser au moins trois fois la même mesure sur un même combustible avec des échantillons prélevés à différents endroits d'un même lot pour avoir une valeur moyenne significative. L'écart-type (S) donnée par la formule suivante permet de mettre en évidence la dispersion des valeurs mesurées avec la moyenne. Il est préférable d'accompagner une valeur moyenne de son écart-type.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n}}$$

Avec :

S : L'écart-type

x : La valeur mesurée

$\bar{x}$  : La valeur moyenne

n : Le nombre de valeur

Formule associé sur Excel : ECARTYPEP

## II. POUVOIR CALORIFIQUE

### 1. Définitions

Le pouvoir calorifique représente la quantité d'énergie contenue dans une unité de masse de combustible. On distingue le PCS (Pouvoir Calorifique Supérieur), le  $PCI_s$  (Pouvoir Calorifique Inférieur sec) et le  $PCI_h$  (Pouvoir Calorifique Inférieur humide). L'unité utilisée est le kilojoule par kilogramme (kJ/kg).

#### 1.1. Pouvoir calorifique supérieur :

Quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de masse de combustible avec récupération par condensation de l'énergie contenue dans la vapeur d'eau produite lors de la combustion. C'est le cas par exemple pour les chaudières à condensation. Si cette énergie n'est pas récupérée, il faut s'intéresser au pouvoir calorifique inférieur.

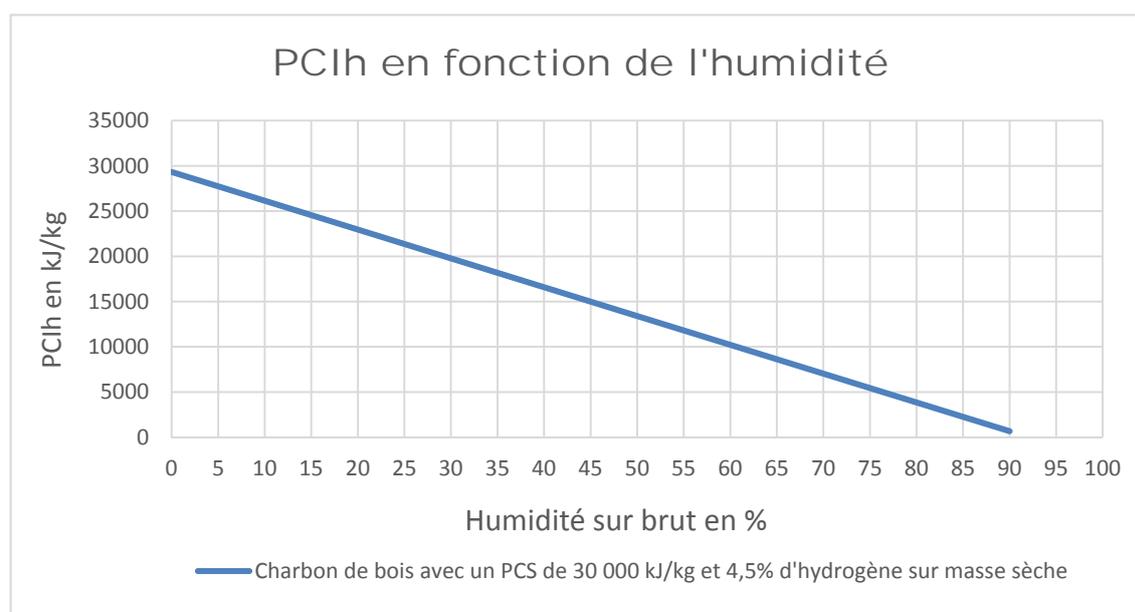
#### 1.2. Pouvoir calorifique inférieur sec :

Quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de masse de combustible sans récupération de l'énergie contenue dans la vapeur d'eau issue de la combustion.

#### 1.3. Pouvoir calorifique inférieur humide :

Quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de masse de combustible sans récupération de l'énergie contenue dans la vapeur et en prenant en compte l'énergie perdue du à la présence d'eau dans le combustible.

Le  $PCI_h$  est donc directement lié à l'humidité du combustible (voir figure 1) et représente la quantité d'énergie réelle pouvant être dégagé. On peut ainsi comparer différents combustibles s'ils ont les mêmes conditions de stockage et une humidité stable.



#### 1. Influence de l'humidité sur le pouvoir calorifique

## 2. Principe

On réalise une combustion parfaite dans une bombe calorimétrique en acier très conductrice de la chaleur. La combustion est dite parfaite car on y introduit un comburant en excès, le dioxygène ( $O_2$ ), sous forte pression. Cette bombe calorimétrique, munie d'un système de mise à feu, est placée dans un récipient adiabatique (pas d'échange thermique avec l'extérieur) rempli préalablement d'une quantité d'eau connue et équipé d'un agitateur. L'étalonnage de la bombe calorimétrique à l'aide d'un combustible (acide benzoïque) dont on connaît le PCS nous permet de connaître la capacité du système calorimétrique (eau et accessoires) à emmagasiner de l'énergie thermique. Par comparaison, on peut calculer le PCS d'un échantillon inconnu.

Le pouvoir calorifique inférieur sec est calculé ensuite à partir du taux massique d'hydrogène du combustible et le pouvoir calorifique inférieur humide est calculé à partir du taux d'humidité sur brut du combustible.

## 3. Appareillage



2. La bombe calorimétrique et ses accessoires

### 3.1. Balance

- Une balance de précision 0,0001 gramme.

### 3.2. Calorimètre adiabatique

- Vase en métal destinée à recevoir la bombe et muni d'un couvercle. Sa section doit être telle que la bombe soit juste immergée avec 2 litres d'eau environ.
- Jaquette : récipient métallique calorifugé, et comportant une double paroi remplie d'eau.
- Agitateur permettant le brassage de l'eau.

### 3.3. Bombe calorimétrique

Surface interne inattaquable par les produits de combustion. Elle est destinée à recevoir la coupelle et le dispositif de mise à feu électrique. Elle doit être résistante à une pression de 210 bars. Ces conditions définissent une bombe permettant de brûler environ 1g de combustible.

### 3.4. Thermomètre

Thermomètre gradué muni d'un dispositif permettant les lectures à 0,002°C près.

### 3.5. Creuset

Creuset sous forme de petite coupelle à fond plat, en platine ou en silice ou en matériau similaire résistant à de fortes températures.

### 3.6. Fil d'allumage

Fil en platine ou en nickel-chrome de 0,1 mm de diamètre et dont on connaît le pouvoir calorifique exprimé en J/cm ou en J/g. Si son pouvoir calorifique est exprimé avec des calories, utiliser la valeur suivante pour le convertir dans l'unité souhaitée : 1 calorie = 4,1868 joules.

## 4. Échantillonnage

L'échantillon de combustible doit peser environ 1g. L'échantillon doit être représentatif du combustible étudié, il est donc nécessaire de s'assurer que celui-ci ne contient aucune caractéristique inhabituelle. Le pastillage à l'aide d'une presse manuelle après broyage est impératif pour une biomasse. Dans le cadre de l'étude d'un charbon, le pastillage ne peut être envisagé car le combustible est trop friable. Il faut donc prélever des morceaux d'environ 1g de combustible comme échantillon.

Prévoir un échantillon pour mesurer l'humidité du combustible.

**DANGER**: il y a risque d'explosion si l'échantillon s'avère être trop friable, la poudre peut se répandre dans la bombe calorimétrique lors de l'injection du dioxygène. La combustion peut avoir lieu dans tout le volume de la bombe calorimétrique et la montée en pression peut s'avérer suffisamment importante pour que le couvercle cède.

Il est donc impératif de ne jamais se positionner au dessus de la bombe calorimétrique lors du déroulement d'une expérience.

## 5. Mode opératoire

### 5.1. Détermination de l'humidité du combustible

- Déterminer l'humidité sur brut du combustible comme indiqué dans la partie 3

### 5.2. Mode opératoire

- Introduire, dans le vase calorimétrique, 2L d'eau. Cette quantité, vérifiée par pesée, doit être la même à 1g près que celle de référence utilisée au cours de l'étalonnage pour la détermination de la capacité calorifique du système. Positionner le vase calorimétrique dans la jaquette.
- Placer l'échantillon dans la coupelle préalablement positionnée sur son support du couvercle de la bombe calorimétrique. Relier les deux bornes internes de la bombe avec le fil

d'allumage de longueur et de pouvoir calorifique connus. Le fil doit avoir le meilleur contact possible avec le combustible, mais sans toucher la paroi de la coupelle.

- Fermer la bombe calorimétrique en prenant soin de ne pas faire de geste brusque afin que l'échantillon ne tombe pas de la coupelle. La bombe peut ensuite être chargée soigneusement de dioxygène jusqu'à une pression de 25 à 30 bars. Il suffit de fermer (visser) la vanne de vidange de la bombe calorimétrique, brancher la bombonne de dioxygène sur la bombe calorimétrique, ouvrir la vanne de la bombonne jusqu'à atteindre une pression comprise entre 25 et 30 bars dans la bombe calorimétrique.
- Placer la bombe calorimétrique dans le vase calorimétrique.
- Ajuster le thermomètre, établir les connexions et mettre l'agitateur en marche. La température de l'eau du calorimètre à jaquette adiabatique doit être stable.
- Noter la température initiale et fermer le circuit électrique pour provoquer l'ignition.
- Observer la température de l'eau du vase toutes les minutes jusqu'à trois lectures successives identique. Noter cette température comme la température finale.
- Retirer la bombe de l'intérieur du vase calorimètre et ouvrir lentement la vanne de vidange pour ramener la pression intérieure à la pression atmosphérique. Ouvrir la bombe et observer si le combustible a été complètement brûlé.
- Retirer le reste du fil et mesurer la longueur (ou la masse) de fil restant.

## 6. Etalonnage

L'étalonnage se fait sur le même mode opératoire qu'évoquer précédemment. Le combustible utilisé est par convention l'acide benzoïque. La quantité d'eau est de 2L et deviendra la référence pour les prochaines expériences.

La capacité thermique du système calorimétrique est calculée avec la formule suivante :

$$C = \frac{m_b \times PC_b + PC_f \times (L_i - L_f)}{(T_f - T_i)} \quad (\text{J/K})$$

Dans laquelle :

- $T_i$ : température initiale de l'eau en degrés Celsius
- $T_f$ : température final de l'eau en degrés Celsius
- $PC_f$ : pouvoir calorifique du fil d'allumage en J/cm
- $L_f$ : longueur de fil d'allumage restant en cm
- $L_i$ : longueur de fil d'allumage initial en cm
- $m_b$ : masse de l'échantillon d'acide benzoïque en gramme
- $PC_b$ : pouvoir calorifique de l'acide benzoïque en J/g

## 7. Expression des résultats

Le pouvoir calorifique supérieur est déterminé par la formule suivante :

$$PCS = \frac{C \times (T_f - T_i) - PC_f \times (L_i - L_f)}{m_h} \quad (\text{kJ/kg})$$

Dans laquelle :

- $C$ : capacité thermique du système calorimétrique en J/K

- $T_i$ : température initiale en degrés Celsius  
 $T_f$ : température final en degrés Celsius  
 $PC_f$ : Pouvoir calorifique du fil d'allumage en J/cm  
 $L_f$ : Longueur de fil d'allumage restant en cm  
 $L_i$ : Longueur de fil d'allumage initial en cm  
 $m_h$ : masse de l'échantillon de combustible en gramme

Remarque : La consommation du fil d'allumage peut être évaluée par une mesure en centimètre ou par une pesée en gramme (précision 0.0001g dans le cas d'une pesée), on aura alors le  $PC_f$  en J/g et  $(m_i - m_f)$  en gramme.

Le pouvoir calorifique inférieur sec se calcule selon la formule suivante :

$$PCI_s = PCS - 25,11 \times 9 \times H\% \text{ (kJ/kg)}$$

Avec  $H\%$  la teneur massique d'hydrogène en pourcentage du combustible sur masse sèche.

On obtient le pouvoir calorifique inférieur humide avec la formule suivante :

$$PCI_h = \left( \frac{100 - H_b\%}{100} \right) \times PCI_s - 25,11 \times H_b\% \text{ (kJ/kg)}$$

Avec  $H_b\%$ , l'humidité sur brut du combustible exprimé en pourcentage.

### III. HUMIDITE

---

#### 1. Définition

Le taux d'humidité représente la teneur en eau de l'échantillon.

Il existe deux types d'humidité :

- L'humidité sur brut qui est le rapport entre la masse d'eau contenue dans l'échantillon et la masse totale de l'échantillon à son humidité initiale. L'humidité sur brut est alors comprise entre 0 et 100%
- L'humidité sur sec qui est le rapport entre la masse d'eau contenue dans l'échantillon et la masse sèche de l'échantillon. L'humidité sur sec peut donc aller au-delà de 100%.

Dans le domaine de l'énergie, on utilise principalement l'humidité sur brut.

#### 2. Principe

Un échantillon humide de masse connue est séché à l'étuve afin de retirer toute l'eau qu'il contient. Après stabilisation à l'état anhydre de l'échantillon, l'humidité initiale est calculée en mesurant la différence de masse.

#### 3. Appareillage

- Balance précise à 0,0001g
- Étuve ventilée permettant de maintenir la température à  $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$

- Plateau résistant à des températures de l'ordre de 105°C



3. Étuve ventilé et balance utilisée à l'Iset pour mesurer l'humidité

#### 4. Échantillonnage

L'échantillon doit contenir entre 50 et 100 g de combustible.

#### 5. Mode opératoire

- Régler l'étuve à 105°C
- Peser le plateau vide, propre et sec
- Placer l'échantillon sur le plateau et peser l'ensemble
- Laisser l'échantillon au moins 10 heures dans l'étuve. L'échantillon doit avoir atteint une masse constante pour être considéré comme anhydre. La masse de l'échantillon est considérée comme constante lorsque la perte de masse entre deux pesées successives effectuées à 1 heure d'intervalle est inférieure ou égale à 0,5g.

#### 6. Expression des résultats

L'humidité sur brut en pourcentage est calculée selon cette formule :

$$H_b(\%) = \frac{m_{eau}}{m_{humide}} \times 100 = \frac{m_h - m_0}{m_h - m_p} \times 100$$

Dans laquelle :

$m_{eau}$  : masse d'eau présente dans l'échantillon

$m_{humide}$  : masse de l'échantillon à l'état humide

$m_p$  : masse en gramme du plateau vide

$m_h$  : masse en gramme du plateau et de l'échantillon avant séchage

$m_0$  : masse en gramme du plateau et de l'échantillon après séchage

L'humidité sur sec en pourcentage est calculée avec la formule suivante :

$$H_s(\%) = \frac{m_{eau}}{m_{anhydre}} \times 100 = \frac{m_h - m_0}{m_0} \times 100$$

$m_{eau}$  : masse d'eau présente dans l'échantillon

$m_{anhydre}$  : masse de l'échantillon à l'état anhydre

## IV. SOLIDITE

---

### 1. Définition

Dans le cadre d'une utilisation domestique, un combustible doit avoir une certaine solidité pour son transport et son utilisation. Un combustible qui n'est pas assez solide peut s'avérer problématique si un récipient est directement posé sur celui-ci ou si le combustible s'effrite facilement durant le transport.

### 2. Principe

Le dispositif conçu à l'Iset permet de laisser tomber, à des hauteurs différentes, une bille en acier sur un combustible solide. L'opérateur relève la hauteur nécessaire à la rupture du combustible.

Si l'on connaît la hauteur et la masse de la bille d'acier on peut calculer l'énergie nécessaire à la rupture du solide. On peut ainsi comparer la solidité des charbons à base de Typha produits dans le cadre du projet avec celle du charbon de bois.



#### 4. Dispositif de test de la solidité

Au premier plan, la pince qui retient la bille d'acier

Au second plan, un échantillon de charbon de Typha positionnée au point d'impact sur le sol

### 3. Appareillage

- Un support gradué au mm près
- Une pince qui peut se visser sur le support gradué
- Une bille d'acier

### 4. Mode opératoire

Il faut dans un premier temps repérer l'emplacement du pied de la règle gradué, s'assurer que le système est bien maintenu en position pour pouvoir repérer la zone de chute de la bille. Celle-ci étant repérée, on peut y placer le solide.

Par tâtonnement et en multipliant les expériences on relève la hauteur minimum moyenne de rupture de l'échantillon en utilisant un nouvel échantillon après chaque chute.

## 5. Expression des résultats

La solidité est évaluée selon l'énergie nécessaire pour atteindre la rupture de l'échantillon avec la formule suivante :

$$E = h \times m \times g$$

E : Énergie (J)

h : hauteur de chute de la bille (m)

m : masse de la bille (kg)

g : constante gravitationnelle (9,8 m/sec<sup>2</sup>)

## V. MASSE VOLUMIQUE

---

### 1. Définition

La masse volumique caractérise un matériau par la quantité de matière (masse) présente dans une unité de volume.

### 2. Principe

La masse volumique d'un combustible peut être calculée avec le rapport entre sa masse et son volume. Cette caractéristique est toujours indiquée en fonction de l'humidité.

### 3. Appareillage

- Balance précise à 0,1 mg
- Eprouvette graduée



5. Epruvette gradué pour la mesure de la densité

### 4. Echantillonnage

Prélever un échantillon de forme adapté à la taille de l'éprouvette. Un échantillon de référence doit être prélevé pour mesurer le taux d'humidité. L'humidité sur brut du combustible doit être inférieure à 8%.

### 5. Mode opératoire

- Mesurer l'humidité sur brut de l'échantillon de référence en se référant au protocole partie 3
- Mesurer la masse de l'échantillon avec une balance précise à 0.1 mg
- Mesurer le volume de l'échantillon en le plongeant dans l'éprouvette graduée contenant de l'eau. Le volume de l'eau déplacé par l'immersion de l'échantillon, dès la première seconde (avant que l'eau soit absorbée par l'échantillon), correspond au volume de l'échantillon (avec 1ml = 1cm<sup>3</sup>).

## 6. Expression des résultats

La masse volumique en  $\text{kg/m}^3$  est donnée par la formule :

$$\rho = \frac{m_h}{V} \times 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Avec :

$m_h$  : masse de l'échantillon à l'état humide en gramme

$V$  : volume de l'échantillon en  $\text{cm}^3$

## VI. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE

---

### 1. Définition

La masse volumique apparente permet de rendre compte de la porosité et de la granulométrie du matériau. On peut ainsi exprimer la quantité de matière contenue dans un volume donné.

### 2. Principe

La mesure consiste à connaître la masse de combustible pouvant être transporté dans un carton de volume connu ou dans un sac type d'une contenance de 50 kg de riz par exemple.

### 3. Appareillage

- Une balance avec une capacité minimale de 30 kg et une précision d'au moins 10 grammes

### 4. Echantillonnage

- 30 kg de combustibles
- 1 sac type de contenance 50 kg de riz
- ou un carton de dimensions minimale l=20cm L=10cm h=15cm

### 5. Mode opératoire

- Mesurer l'humidité sur brut du combustible
- Peser l'emballage vide ( $m_V$ )
- Mesurer les dimensions du sac ou du carton pour calculer son volume  $V$  en  $\text{m}^3$
- Introduire le maximum de combustible sans entraver à la fermeture de l'emballage
- Pour l'emballage carton, faire différents essais, en vrac et en rang
- Fermer l'emballage
- Peser l'ensemble ( $m_T$ )

## 6. Expression des résultats

L'humidité sur brut de l'échantillon doit être comprise entre 2 et 8 %.

La masse volumique apparente exprimée en  $\text{kg/m}^3$  est calculée selon la formule suivante et s'exprime sous forme de plage allant du minimum au maximum:

$$\rho_{app} = \frac{\text{Masse}_{\text{combustible}}}{\text{Volume}_{\text{contenant}}} = \frac{m_T - m_V}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Les dimensions d'un sac de riz de contenance 50 kg de riz sont estimées à  $0,2 \times 0,5 \times 0,7$  mètres soit  $0,07 \text{ m}^3$ .

## VII. FACILITE D'ALLUMAGE

---

### 1. Définition

La facilité d'allumage permet de mettre en évidence, à titre comparatif, la durée nécessaire pour allumer un combustible.

### 2. Principe

Un dispositif a été conçu à l'Iset pour maintenir un échantillon de combustible sous une flamme semblable à celle d'un briquet traditionnel. Le temps nécessaire pour que l'échantillon démarre sa combustion est mesuré en seconde. L'allumage est d'autant plus facile que le temps mesuré est faible.

### 3. Échantillonnage

Prélever un échantillon adapté au support disponible.

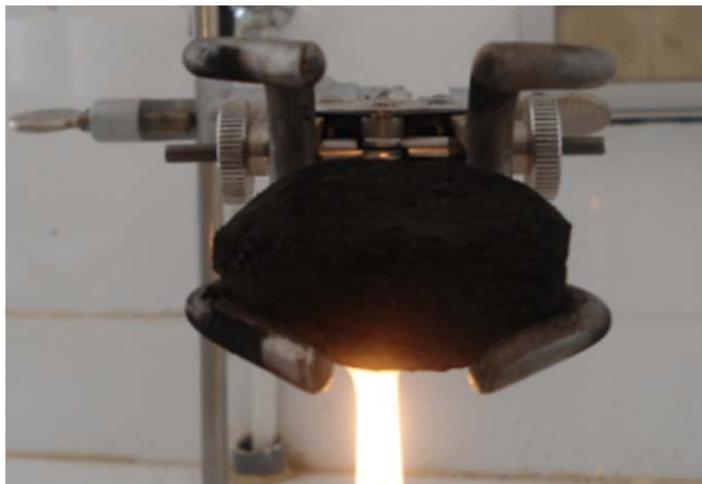
Un échantillon de référence est nécessaire pour mesurer le taux d'humidité. L'humidité sur brut du combustible doit être inférieure à 8%.

### 4. Appareillage

- Dispositif permettant le maintien du combustible
- Bougie et son support (s'assurer d'avoir assez de bougie identique pour avoir des résultats comparatifs)

### 5. Mode opératoire

- Mesurer l'humidité sur brut de l'échantillon de référence en se référant au protocole partie 3 ;
- Placer l'échantillon dans son support et choisir la partie la plus apte à s'allumer facilement ;
- Allumer la bougie sous le combustible en s'assurant que la flamme effleure le combustible à l'endroit souhaité et mettre le chronomètre en marche ;
- Arrêter le chronomètre dès qu'une partie de l'échantillon rentre en combustion (devient rouge) et noter le temps en seconde.



6. Dispositif de test de facilité d'allumage

## 6. Expression des résultats

La facilité d'allumage est évaluée par le temps nécessaire en seconde pour parvenir à allumer une partie du combustible.

## VIII.TAUX DE CENDRES

---

### 1. Définition

Les cendres sont les résidus solides issus de la combustion de matières organiques et minérales. Dans le contexte d'une utilisation domestique de combustibles solides, les cendres peuvent être une préoccupation importante des utilisatrices qui doivent secouer plus ou moins le foyer en fonction de leur quantité.

### 2. Principe

L'échantillon est incinéré jusqu'à atteindre une masse constante à une température de  $850 \pm 10^\circ\text{C}$  dans un four à moufle. Le taux de cendres est le rapport entre la masse du résidu après incinération et la masse de l'échantillon anhydre.

### 3. Appareillage

- Un four à moufle permettant d'aller à des températures supérieures à  $1000^\circ\text{C}$
- Une étuve ventilée permettant de maintenir la température à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$
- Une balance précise à 0,1 mg
- Un creuset en silice, porcelaine ou platine capable de résister à de très hautes températures



7. Four à moufle avec ses creusets à l'Iset

#### 4. Echantillonnage

L'échantillon est d'abord broyé et doit être compris entre 1 et 2 grammes.

#### 5. Mode opératoire

- Placer l'échantillon dans une étuve à 105°C jusqu'à atteindre une masse constante
- Laver le creuset et le placer à l'étuve à 105°C. Une fois une masse constante atteinte, mesurer la masse du creuset qu'on notera  $M_C$
- Placer l'échantillon dans le creuset, on notera  $M_T$  la masse total anhydre de l'échantillon et du creuset avant incinération
- Placer le creuset contenant l'échantillon dans le four à moufle. Le préchauffage n'est pas nécessaire, allumer et régler la température à 850°C une fois les échantillons placés à l'intérieur.
- Laisser plusieurs heures jusqu'à l'obtention de cendres sans présence de points noirs (imbrûlés) et stabilisation de la masse de l'échantillon
- Laisser refroidir puis mesurer la masse finale du creuset contenant les cendres, noté  $M_F$ . Attention à la reprise d'humidité, les échantillons doivent rester à l'état anhydre, les placers dans l'étuve à 105°C si nécessaire.

#### 6. Expression des résultats

Le taux de cendres du combustible que l'on notera  $C(\%)$  en pourcentage en masse est donné par la formule :

$$C(\%) = \frac{M_{cendres}}{M_{anhydre}} = \frac{M_F - M_C}{M_T - M_C} \times 100$$

Avec :

$M_{cendres}$  : masse de cendres dans l'échantillon

$M_{anhydre}$  : masse de l'échantillon à l'état anhydre

$M_C$  : masse du creuset en gramme

$M_T$  : masse totale du creuset et de l'échantillon avant incinération en gramme

$M_F$  : masse finale du creuset et des cendres après incinération en gramme

## IX. TEST D'EBULLITION DE L'EAU (TEE)

---

### 1. Définition

Le test d'ébullition de l'eau permet de comparer les caractéristiques de différents combustibles ou de différents foyers. Déjà très employé pour comparer les performances de foyers améliorés, le protocole suivant sera plus adapté pour comparer différents combustibles sur un même type de foyer.

### 2. Principe

Une fournée de combustibles chauffent une marmite contenant une quantité d'eau initiale fixe. Deux phases seront étudiées, une phase de montée en température où l'on s'intéressera au temps nécessaire pour atteindre l'ébullition ainsi que la masse de combustible consommé puis, une phase de maintien à l'ébullition que l'on appellera « mijotage » ou l'on s'intéressera à la masse de charbon consommée sur une durée de 60 minutes. On mesurera aussi la masse d'eau évaporée durant le test d'ébullition d'eau pour connaître l'efficacité énergétique du système en calculant le rapport entre l'énergie reçue par l'eau et l'énergie dégagée par le combustible.

### 3. Exigences

Les tests d'ébullition d'eau doivent se faire en laboratoire avec un extracteur de fumée performant. Toutefois si cela n'est pas possible, le lieu choisi doit respecter les conditions suivantes :

- Être à l'abri du vent sans négliger l'extraction des fumées
- Être à l'abri du soleil afin de minimiser les apports d'énergie thermique naturelle
- Avoir un espace de travail réservé pour éviter les passages de gens qui pourraient créer des courants d'air ou gêner les opérateurs

#### 4. Appareillage



8. Test d'ébullition de l'eau avec un foyer malgache et du charbon de Typha

##### *Équipements de mesure*

- Un chronomètre
- Une balance avec une capacité d'au moins 6 kg avec une précision de  $\pm 1$  gramme
- Un thermomètre numérique avec une sonde thermocouple adaptée à l'immersion dans les liquides

##### *Ustensiles et combustibles*

- Foyer et marmite du même type que celui qui est utilisé localement pour faire la cuisine
- Un dispositif pour maintenir immerger le thermocouple dans l'eau. La sonde devra se trouver en partie centrale de la marmite avec une distance de 5 cm entre le fond de la marmite et la sonde
- Les conditions de stockages doivent être les mêmes pour les différents combustibles testés pour éviter l'effet de l'humidité sur les résultats. Il est recommandé de les stockés dans un endroit à l'abri de l'humidité

##### *Le starter*

- Pour démarrer le feu de manière reproductible, utiliser par exemple de la biomasse imprégnée d'alcool à brûler, toujours dans les mêmes quantités.

##### *L'eau à bouillir*

- La quantité d'eau doit correspondre aux pratiques locales

#### 5. Echantillonnage

Dans notre contexte, nous utiliserons un foyer de type malgache avec une quantité de combustible fixée 1 kg et une quantité d'eau fixée à 3 litres.

## 6. Mode opératoire

### *Conditions initiales*

- Réaliser une mesure d'humidité du combustible pour déterminer son  $PCI_h$  à partir du PCS préalablement mesuré à l'aide de la bombe calorimétrique (voir parties 2 et 3)
- Noter les conditions météorologiques : température ambiante, intensité du vent (fort, moyen, faible), l'humidité relative de l'air (relevée avec un hygromètre)
- Peser la marmite vide avec le couvercle ( $M_0$ )
- Remplir la marmite avec 3 litres d'eau et refermer le tout
- Peser la marmite pleine avec le couvercle ( $M_1$ )
- Nettoyer le foyer, puis le peser ( $F_0$ )

### *Phase 1: Montée en température*

- Placer 1kg de combustible dans le foyer et peser le foyer avec le combustible ( $F_1$ )
- Démarrer la combustion jusqu'à obtenir un départ de combustion homogène
- Peser le foyer avec le combustible après allumage
- Noter la température de l'eau dans la marmite ( $T_0$ )
- Poser la marmite pleine avec le couvercle et son thermocouple
- Démarrer le chronomètre. Veiller à ne jamais déplacer brusquement la marmite ou le foyer
- Une fois l'état de l'ébullition atteint, relever la température de l'eau  $T_e$  et le temps  $t_e$
- Peser la marmite et son couvercle ( $M_2$ )
- Peser le foyer avec le combustible restant sans la marmite ( $F_2$ )

### *Phase 2 : Mijotage*

- Reposer la marmite sur le foyer et fermer le volet s'il existe pendant 60 minutes
- Laisser mijoter pendant 60 minutes, veiller à ce que la température de l'eau ne descende pas en dessous de  $97^\circ\text{C}$ , si cela arrive le test n'est plus valable
- 60 minutes après le début de l'ébullition, peser la marmite et son couvercle ( $M_3$ )
- Peser le foyer avec le combustible restant sans la marmite ( $F_3$ )

## 7. Expression des résultats

### 7.1. Notations

$t_e$  : Temps d'ébullition, temps nécessaire pour parvenir à l'ébullition du contenu initial de la marmite à sa température initiale (min)

$t_{es}$  : Temps d'ébullition spécifique, temps nécessaire pour parvenir à l'ébullition du contenu initial de la marmite entre la température de référence ( $30^\circ\text{C}$ ) et la température d'ébullition (min)

$T_{ref}$  : Température de référence pour calculer le temps d'ébullition spécifique

$dT/dt$  : Gradient de montée en température durant la phase de montée en température (K/min)

$M_{ch}$  : Masse de charbon consommée (kg)

$L_{vap}$  : Chaleur latente massique de vaporisation de l'eau à  $100^\circ\text{C}$  ( $L_{vap} = 2257 \text{ kJ/kg}$ )

$C_{p,eau}$  : Capacité thermique massique de l'eau à pression constante ( $C_{p,eau} = 4,185 \text{ kJ/kg.K}$ )

$PCI_h$  : Pouvoir calorifique inférieur humide du combustible (kJ/kg)

$\eta$  : Efficacité énergétique du système. Correspond au rapport entre la quantité d'énergie reçue par l'eau contenue dans la marmite et la quantité d'énergie dégagée par la consommation du combustible. Ce rapport s'exprime en pourcentage.

## 7.2. Première phase : montée en température

Masse d'eau initiale présente dans la marmite en kg:

$$M_{ei} = M_1 - M_0$$

Masse d'eau évaporée durant la première phase en kg:

$$M_{ev1} = M_1 - M_2$$

Masse de charbon consommée en kg:

$$M_{ch1} = F_1 - F_2$$

Gradient de montée en température pour atteindre  $t_{eb1}$  (K/min) :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_e - T_0}{t_e - t_0}$$

Temps d'ébullition spécifique en minutes :

$$t_{es} = \frac{T_e - T_{ref}}{dT/dt}$$

Efficacité énergétique du système lors de la première phase en pourcentage :

$$\eta_1 = \frac{M_{ei} \times C_{p,eau} \times (T_e - T_0) + M_{ev1} \times L_{vap}}{M_{ch1} \times PCI_h} \times 100$$

## 7.3. Deuxième phase : mijotage

Masse d'eau évaporée en kg:

$$M_{ev2} = M_2 - M_3$$

Masse de charbon consommée en g :

$$M_{ch2} = F_2 - F_3$$

Efficacité énergétique du système pendant la deuxième phase en pourcentage :

$$\eta_2 = \frac{M_{ev2} \times L_{vap}}{M_{ch2} \times PCI_h} \times 100$$

## 7.4. Sur l'ensemble du TEE

Masse d'eau totale évaporée en kg:

$$M_{evT} = M_3 - M_1$$

Masse de charbon consommée en g :

$$M_{chT} = F_1 - F_3$$

Efficacité énergétique du système en pourcentage :

$$\eta_T = \frac{M_{ei} \times C_{p,eau} \times (T_e - T_0) + L_{vap} \times M_{evT}}{M_{chT} \times PCI_h} \times 100$$

## **8. Limites d'interprétation du TEE**

L'interprétation des résultats doit tenir compte de la difficulté de contrôler certains paramètres de manière précise, comme par exemple la qualité de l'allumage, l'homogénéité du combustible utilisé, le positionnement de la marmite par rapport au combustible et la similitude des foyers. Il est donc important de noter toutes observations sur le déroulement du TEE et de réaliser au moins trois mesures par combustible.

## **X. TEST DE CUISINE COMPAREE (TCC)**

---

### **1. Définition**

Le test de cuisine comparée permet d'observer en condition réelle, le comportement de la cuisson d'un repas traditionnel en fonction de différents combustibles avec le même dispositif de cuisson (foyer et marmite) et les mêmes paramètres (quantités de combustibles, d'aliments, d'eau, opérateur unique, etc.).

### **2. Principe**

Cuisiner un repas traditionnel local (thiéboudienne - riz au poisson dans notre cas) avec des combustibles différents mais dans les mêmes conditions pour comparer : le temps de cuisson, la quantité de charbon consommée, l'utilisation du combustible par l'opérateur et la qualité de la cuisson.

### **3. Exigences**

Le test de cuisine comparée veut se rapprocher au maximum des conditions réelles de cuisine, il est donc préférable de le faire à l'extérieur dans un endroit où les femmes ont l'habitude de cuisiner. Il est nécessaire de disposer de plusieurs foyers identiques et d'avoir un unique opérateur au cours du test pour exploiter les résultats de manière comparative.

Il est conseillé d'avoir un espace de travail réservé pour éviter les passages de gens qui pourraient gêner l'opérateur.

Les conditions météorologiques étant différents à chaque série, il est conseillé d'exploiter différentes séries dans différentes conditions afin de connaître le comportement du combustible et de l'opérateur selon des conditions météorologiques différentes.

#### 4. Appareillage



##### 9. Foyers malgaches avec marmites et thermocouples lors d'un test de cuisine comparée

- Des foyers du même type que ceux utilisés localement pour faire la cuisine
- Une montre
- Une balance avec une capacité d'au moins 20 kg avec une précision de  $\pm 10$  grammes
- Une éprouvette graduée d'au moins 50 cl
- Un thermomètre numérique avec une sonde thermocouple adaptée à l'immersion dans les liquides

#### 5. Echantillonnage

- 1 kg de combustible par foyer + 1 kg de combustible en réserve par foyer si la cuisson nécessite plus de combustible.

#### 6. Mode opératoire

Les préparations culinaires nécessaires pour les différents tests se font séparément.

##### *Conditions initiales*

- Noter les conditions météorologiques : température ambiante, intensité du vent (fort, moyen, faible), l'humidité relative de l'air (relevée avec un hygromètre)
- Peser le foyer vide ( $F_0$ )
- Mettre 1 kg de charbon dans chaque foyer
- Peser le foyer plein ( $F_1$ )
- Peser 1 kg de poisson
- Peser 1,2 kg de légumes
- Mesurer 2 litres d'eau
- Peser 1,5 kg de riz
- Mesurer 0,5 litre d'huile

##### *Démarrage*

- Allumer les foyers et noter l'heure d'allumage pour chaque foyer ( $H_a$ )
- Poser la marmite et noter l'heure ( $H_m$ )
- Ajouter 0,5 litre d'huile dans chaque marmite et noter l'heure ( $H_h$ )

- Ajouter le poisson une fois que l'huile est chaude et noter l'heure ( $H_{hc}$ )
- Rajouter l'eau après les cuissons à l'huile et noter l'heure ( $H_{eau}$ )

### *Cuisson*

- Ajouter les légumes et noter l'heure ( $H_l$ )
- Noter l'heure dès que l'eau a atteint l'ébullition ( $H_e$ )
- Retirer les aliments une fois cuits et noter l'heure ( $H_{ca}$ )
- Rajouter de l'eau seulement si nécessaire et noter cette quantité en litre (MA) en indiquant l'heure
- Rajouter le riz dans chaque marmite et noter l'heure ( $H_r$ )
- Rajouter du charbon seulement si nécessaire et noter la quantité ajoutée en kg (QA) en indiquant l'heure
- Sitôt que la cuisinière estime que la cuisson du riz est terminée, noter l'heure et peser chaque foyer avec le charbon et les braises restants ( $H_{cr}$  et  $F_2$ )
- Si c'est possible, peser séparément les braises restantes en dissociant les cendres délicatement puis les peser (QR)

## 7. Notations

$H_a$  : Heure d'allumage du combustible

$H_m$  : Heure de pose de la marmite vide

$H_h$  : Heure d'ajout de l'huile

$H_{hc}$  : Heure une fois que l'huile est chaude

$H_{eau}$  : Heure d'ajout de l'eau

$H_l$  : Heure d'ajout des légumes

$H_e$  : Heure où l'eau a atteint l'ébullition

$H_{ca}$  : Heure de fin de cuisson des aliments

$H_r$  : Heure où l'on introduit le riz

$H_{cr}$  : Heure de fin de cuisson du riz

$F_0$  : Foyer vide en kg

$F_1$  : Foyer avec la masse de combustible initiale en kg

$F_2$  : Foyer plein à la fin du test en kg

MA : Masse de combustible ajoutée au cours du test en kg (accompagnée de l'heure)

QA : Quantité d'eau ajoutée au cours du test en kg (accompagnée de l'heure)

QR : Quantité de braises restantes à la fin du test

## 8. Expression des résultats

**QI** : Quantité initiale de charbon en kilogramme

$$QI = F_1 - F_0$$

**QT** : Quantité total de charbon introduite dans le foyer en kilogramme

$$QT = QI + QA$$

**QF** : Quantité finale de charbon en kilogramme (= QR si cette donnée est disponible)

$$QF = F_2 - F_0$$

**QU** : Quantité de combustible consommé en kilogramme

$$QU = QI - QF - QA$$

**TA** : Temps d'allumage en minute

$$DA = H_m - H_a$$

**TCH** : Temps de chauffage de l'huile en minute

$$TCH = H_{hc} - H_h$$

**TCM** : Temps de chauffage de la marmite en minute

$$TCM = H_{hc} - H_h$$

**TCP** : Temps de cuisson du poisson

$$TCP = H_{eau} - H_{hc}$$

**TCE** : Temps de chauffage de l'eau

$$TCP = H_l - H_{eau}$$

**TE** : Temps d'ébullition de l'eau

$$TCP = H_e - H_{eau}$$

**TCA** : Temps de cuisson des aliments en minute

$$TCA = H_{ca} - H_l$$

**TCR** : Temps de cuisson du riz en minute

$$TCR = H_{cr} - H_r$$

**TTC** : Temps total de cuisson en minute

$$TTC = H_{cr} - H_a$$

Ces résultats peuvent être complétés par une dégustation des différents plats par un panel de consommateurs évaluant la qualité de la cuisson.

## 9. Limites d'interprétation du TCC

L'interprétation des résultats doit tenir compte des difficultés à contrôler certains paramètres, comme par exemple la qualité de l'allumage, l'homogénéité de la combustion, ainsi que la sur-cuisson des aliments. Il est donc important de noter toutes observations sur le déroulement du TCC et de réaliser au moins trois mesures par combustible.

## **XI. BIBLIOGRAPHIE**

---

ADEME. (2001). *Mesure des caractéristiques des combustibles bois.*

ADEME. (2002). *Validation des méthodes de mesures des caractéristiques des combustibles bois déchiquetés.*

Global Alliance for Clean Cookstoves. (2014). *The water boiling test version 4.2.3.*

Massé, R. (2008). *Conception d'un foyer amélioré domestique à charbon de bois en Afrique subsaharienne.*

PERACOD. (2006). *Tests de cuisine comparés - Charbon de bois et Biocharbon.* Saint Louis (Sénégal).

Rozis, J.-F. (2008). *Protocole de Test d'Ébullition de l'Eau Comparatif.*

Pour aller plus loin, les documents suivants sont accessibles en téléchargement sur le site du Gret — [www.gret.org](http://www.gret.org) :

- Document de synthèse : « Production de charbon de Typha en alternative au charbon de bois en Mauritanie »
- Fiche descriptive du *Typha australis*
- Cahier technique n° 1 : « Guide de production artisanale de charbon de Typha »
- Cahier technique n° 2 : « Guide de production semi-industrielle de charbon de Typha »
- Cahier technique n° 4 : « Caractéristiques physico-chimiques de charbons produits à base de *Typha australis* »
- Cahier technique n° 5 : « Guide pour la récupération d'une zone de pêche suite à la coupe manuelle de *Typha australis* »

## CONTACTS

Représentation du Gret en Mauritanie

**e-mail** : [mauritanie@gret.org](mailto:mauritanie@gret.org) / **tél.** : +222 45 25 84 96

**[www.gret.org/mauritanie](http://www.gret.org/mauritanie)**

**En Mauritanie** : Tourad Ould Sery, [touradsery.mr@gret.org](mailto:touradsery.mr@gret.org)

**Au siège** : Julien Cerqueira, [cerqueira@gret.org](mailto:cerqueira@gret.org)

PROJET FINANCÉ PAR :



*Le contenu de ce document relève de la seule responsabilité du Gret et ne peut en aucun cas être considéré comme reflétant l'avis des partenaires financiers.*