ADEME

Agence de
l'Environnement
et de la Maîtrise
de l'Energie

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

ADEME

Critt Bois – Fibois – CTBA

JUILLET 2001

Cribois

FIBOIS
La filière bois Ardèche-Drôme

CTBA

SOMMAIRE

AVANT PROPOS page 4

1 - LA PRISE D'ECHANTILLON page 6
1.1 - Division et/ou mélange du prélèvement accompagnée de la mesure d'un des échantillons
1.2 - Réduction de la taille du prélèvement suivi de la mesure de plusieurs échantillons page 7

2 - POUVOIR CALORIFIQUE page 9
2.1 - Définitions
2.1.1 - PCS
2.1.2 - PCI
2.2 - Unités
2.3 - PCI et essence page 10
2.4 - Méthode 1 : mesure du PCI page 11
2.4.1 - Principe
2.4.2 - Appareillage
2.4.3 - Mode opératoire
2.4.4 - Expression des résultats page 12
- Pouvoir calorifique supérieur
- Pouvoir calorifique inférieur sur sec à l'air

2.4.5 - Coût de la méthode page 13
- Matériel
- Mesures

2.5 - Méthode 2 : détermination du PCI a partir de l'humidité page 14
2.6 – Synthèse page 15

3 – HUMIDITE page 17
3.1 - Définitions
3.2 - Méthodes par déshydratation : principe
3.3 - Méthode 1 : étuvage page 18
3.3.1 - Mode opératoire
3.3.2 - Expression des résultats
3.3.3 - Coût de la méthode
- Matériel
- Mesures

3.4 - Méthode 2 : par lampes infra rouge page 19
3.5 - Méthode 3 : par micro ondes page 20
3.5.1 - Mode opératoire
3.5.2 - Expression des résultats
3.5.3 - Coût de la méthode
3.6 - Méthode diélectrique page 21
3.7 – Synthèse page 22

4 – GRANULOMETRIE page 24
- 4.1 - Définition
- 4.2 - Méthode 1
  - 4.2.1 - Principe
  - 4.2.2 - Appareillage
  - 4.2.3 - Mode opératoire
  - 4.2.4 - Expression des résultats
  - 4.2.5 -Coût de la méthode
    - Matériel
    - Mesures
- 4.3 - Méthode 2 page 25
  - 4.3.1 - Principe
  - 4.3.2 - Appareillage
  - 4.3.3 - Mode opératoire
  - 4.3.4 - Expression des résultats
  - 4.3.5 - Coût de la méthode
    - Matériel
    - Mesures
- 4.4 – Synthèse page 26

5 - TAUX DE CENDRES page 28
- 5.1 - Principe
- 5.2 - Appareillage
- 5.3 - Mode opératoire
- 5.4 - Expression des résultats
- 5.5 - Coût de la méthode page 29
  - Matériel
  - Mesures

6 - TAUX D'ECORCE page 31
- 6.1 - Méthode 1
- 6.2 - Méthode 2

7 – PRECONISATIONS page 33
- 7.1 - Contrôle du respect du cahier des charges d'un combustible
  - 7.1.1 - Prise d'échantillon
  - 7.1.2 - Humidité
  - 7.1.3 - PCI
  - 7.1.4 – Granulométrie page 34
  - 7.1.5 - Taux de cendre et taux d'écorce
- 7.2 - Facturation

AVANT PROPOS

Avec le nombre croissant de chaufferies automatiques bois qui se développent et les différents fournisseurs potentiels, se pose la difficile question de la mesure des caractéristiques des combustibles bois employés.

La connaissance des caractéristiques des combustibles bois relève de deux nécessités :

1. Le contrôle du respect du cahier des charges d'un combustible
2. La facturation du combustible

Au poids ou au volume, il est évident que la facturation du bois au PCI (pouvoir calorifique inférieur) constitue la méthode la plus fiable, encore faut-il mesurer correctement les paramètres du bois livré dont le plus important : l'humidité.

Les caractéristiques des combustibles concernés sont :

- le Pouvoir Calorifique Inférieur
- l'humidité
- la granulométrie
- le taux de cendres
- le taux d'écorce

Par ailleurs, devant l'hétérogénéité des combustibles employés, le mode d'échantillonnage revêt une importance toute particulière.

LA PRISE D'ECHANTILLON

1 - LA PRISE D'ECHANTILLON

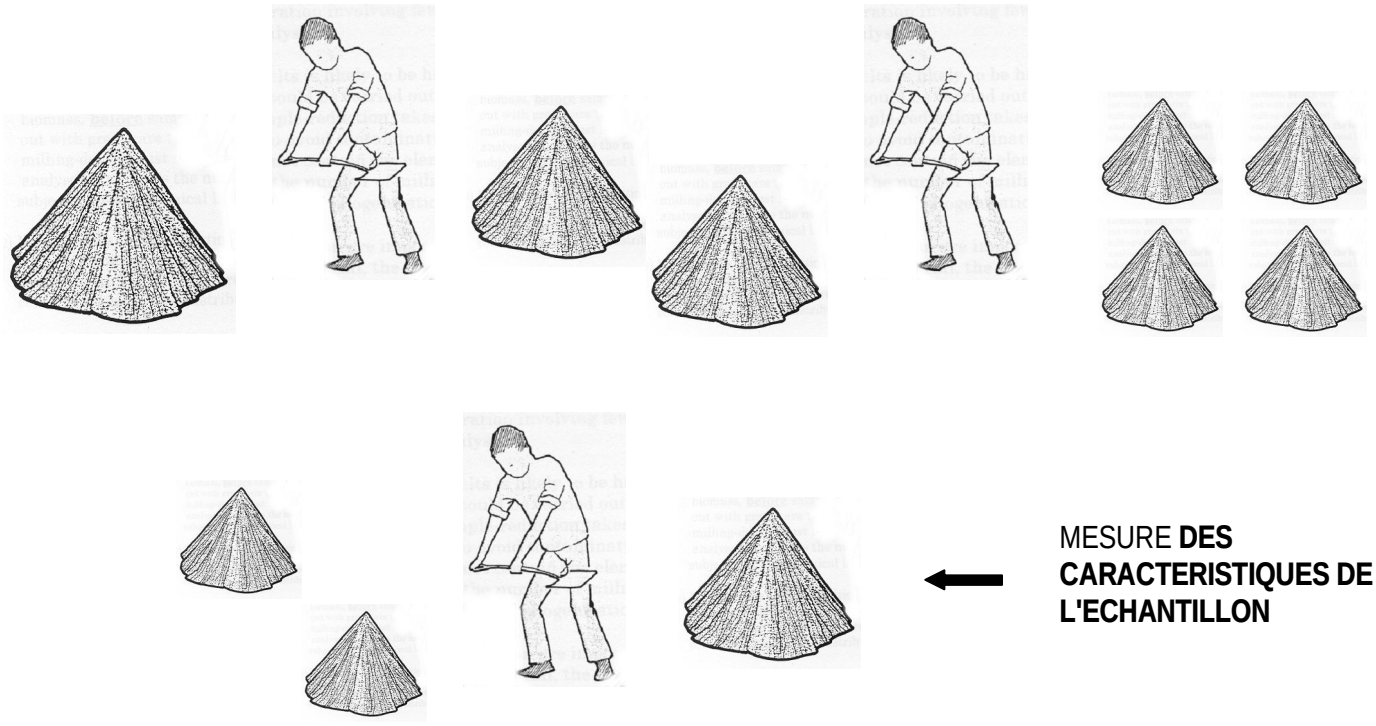
La prise d'échantillon est capital pour la bonne représentativité des mesures réalisées à partir des échantillons prélevés.

La quantité de combustible prélevé dépend de la mesure à réaliser (une mesure de PCI ne nécessite que quelques grammes de combustible, une mesure d'humidité peut nécessiter plusieurs dizaines de litres de combustible).

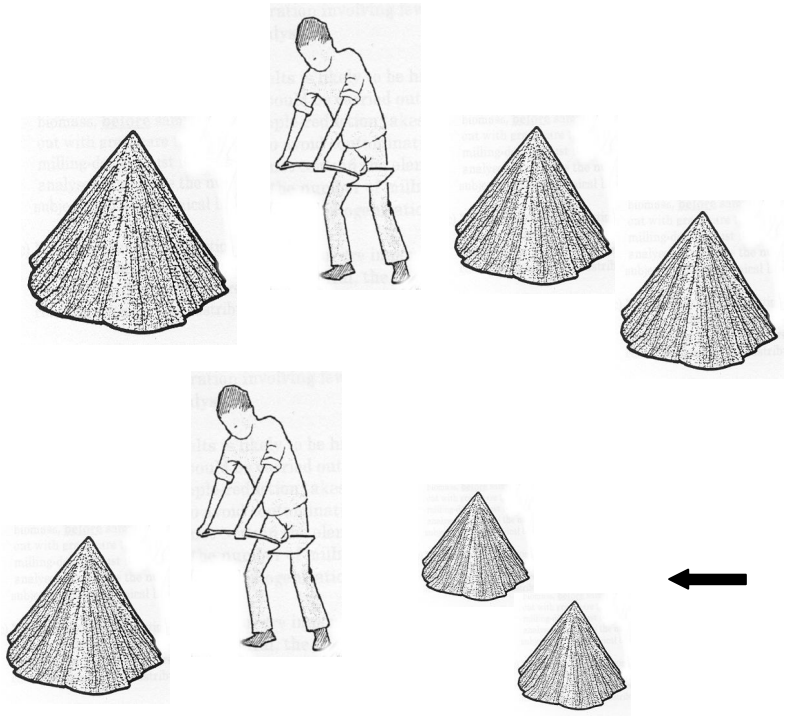
Devant l'hétérogénéité des combustibles, il est absolument nécessaire de prélever des échantillons en différents points du stock ou de la benne qui livre : essayer de prélever des échantillons à la fois en superficie du tas de combustible mais aussi le plus au cœur possible de celui-ci.

Deux techniques (tout aussi valable l'une que l'autre) peuvent être adoptées :

1.1 - Division et/ou mélange du prélèvement accompagnée de la mesure d'un des échantillons



1.2 - Réduction de la taille du prélèvement suivi de la mesure de plusieurs échantillons



MESURES **DES CARACTERISTIQUES DE L'ECHANTILLON**

POUVOIR CALORIFIQUE

2 - POUVOIR CALORIFIQUE

2.1 - Définitions :

Le pouvoir calorifique représente la quantité d'énergie contenue dans une unité de masse de combustible. On distingue le PCS (Pouvoir calorifique supérieur) et le PCI (Pouvoir calorifique Inférieur).

2.1.1 - PCS :

Il s'agit de l'énergie dégagée par la combustion du bois en récupérant la chaleur latente de la vapeur d'eau produite par la combustion. Toutes les mesures existantes déterminent cette énergie. Elle reste néanmoins une valeur théorique pour le bois énergie dans la mesure où il faudrait récupérer la chaleur latente de l'eau via la condensation de la vapeur d'eau des fumées.
Ce type de technologie étant très peu diffusé en France, on détermine le plus généralement le Pouvoir Calorifique Inférieur.

2.1.2 - PCI :

Il s'agit de l'énergie dégagée par la combustion du bois sans récupérer la chaleur latente de la vapeur d'eau produite par la combustion.
Les mesures existantes ne peuvent déterminer directement cette énergie : il faut la calculer à partir du PCS.
Cette énergie est l'énergie théoriquement récupérable par l'utilisateur (dans le cas d'une combustion parfaite). Il s'agit donc de la donnée la plus intéressante à utiliser dans le cas du bois énergie.

2.2 - Unités :

Le pouvoir calorifique donne une valeur d'énergie contenue dans une unité de masse du combustible. L'unité SI est le J/g, l'unité la plus généralement utilisée dans la littérature est le kcal/kg et pour le bois énergie le kWh/tonne.

Pour mémoire, les correspondances entre ces différentes unités sont :

	J/g	Kcal/kg	KWh/tonne
J/g	1	0.24	0.278
Kcal/kg	4.18	1	1.161
kWh/tonne	3.6	0.86	1

Le pouvoir calorifique est donc une donnée intrinsèque du bois qui dépend de sa composition propre. Les valeurs rencontrées dans la littérature sont généralement données à l'état anhydre.

Deux méthodes de détermination du PCI seront décrites : l'une par mesure directe, l'autre par détermination de l'humidité.

2.3 - PCI et essence

De nombreuses valeurs de PCI en fonction de l'essence sont données dans la littérature :

(Les essences ont été réparties entre feuillus et résineux et classées par superficie sur le territoire français.)

Essence Feuillus	PCI en kWh/tonne
Chêne	5 040
Hêtre	5 140
Châtaignier	5 190
Charme	4 970
Frêne	5 090
Bouleau	5 020
Acacia	5 270
Aulne	4 910
Peuplier	4 890
Orme	5 170
Moyenne	**5 070**
Ecart maximum	**380** **soit 8%**

Les 5 premières essences représentent 85% des feuillus présents sur notre territoire. L'écart maximal sur ces essences ne représente que 4%.

Essence Résineux	PCI en kcal/kg
Pin maritime	5 350
Sapin	5 320
Epicéa	5 260
Pin sylvestre	5 350
Douglas	5 290
Mélèze	5 400
Moyenne	**5 330**
Ecart maximum	**60** **soit 1%**

L'écart maximal entre toutes les essences résineuses est infime.

L'écart maximal toutes essences confondues est de 10%.

L'essence n'a donc qu'une importance restreinte sur le pouvoir calorifique

2.4 - Méthode 1 : mesure du PCI

Cette méthode est décrite par la norme NF M 03-005 « Détermination du pouvoir calorifique supérieur et calcul du pouvoir calorifique inférieur »

2.4.1 - Principe

La prise d'essai est réalisée dans une bombe calorimétrique en présence d'oxygène. Le pouvoir calorifique supérieur est donc déterminé à volume constant à partir de l'élévation de température constatée compte tenu des réactions chimiques secondaires et éventuellement des pertes thermiques.
Le pouvoir calorifique inférieur est calculé ensuite à partir d'une décomposition élémentaire du bois mesuré.

2.4.2 - Appareillage

Les mesures sont réalisées dans une bombe calorimétrique d'une capacité de 250 à 350 ml plongée dans un vase calorimétrique lui-même inclus dans une jaquette isolante. L'échantillon est placé dans une coupelle de 25mm de diamètre et d'une hauteur de 14 à 19 mm. L'échantillon ne doit pas donc excéder 9 ml soit en moyenne 4 grammes pour du bois.

La combustion est déclenchée électriquement généralement par un fil de tungstène. La combustion a lieu en présence d'oxygène

2.4.3 - Mode opératoire

Dans un premier temps, l'appareillage est étalonné avec une pastille d'acide benzoïque. La masse en eau est déterminée (bombe calorimétrique et calorimètre).

Les échantillons sont broyés pour avoir une granulométrie inférieure à 0.2 mm, ils sont ensuite pesés à 0.1 mg près

Un échantillon est gardé pour une mesure d'humidité (voir chapitre teneur en humidité).

L'échantillon est placé dans la coupelle, la bombe calorimétrique est chargée en oxygène à une pression de 25 bars.

La combustion est déclenchée électriquement.

Un suivi de la température d'eau est effectué toutes les trente secondes avant et après la combustion jusqu'à l'obtention d'un régime linéaire de refroidissement.

A la suite de ces mesures, la bombe calorimétrique est démontée pour vérifier que la combustion est complète (ni dépôt de suie ni carbone résiduel). La bombe est ensuite rincée avec de l'eau distillée pour récolter les divers acides produits par la combustion.

Des corrections doivent être apportées pour tenir compte :

- des acides formés lors de la combustion (dosage avec des solutions de carbonate de sodium et d'hydroxyde de baryum).
- de la chaleur de combustion du fil d'allumage (par pesée puis calcul)
- des échanges de chaleur avec l'extérieur (calcul)

2.4.4 - Expression des résultats

➢ Pouvoir calorifique supérieur

Le pouvoir calorifique supérieur est déterminé par la formule suivante :

$$Py = \frac{(4{,}1868 * E) * (tm - ti + c) - (a + b)}{M}$$

Le pouvoir calorifique supérieur à volume constant sur sec est obtenu en multipliant :

$$\text{Pv par } \frac{100}{100 - h1}$$

Dans laquelle :

E = équivalent en eau du calorimètre de la bombe, de leurs accessoires et de l'eau introduite dans la bombe
ti = température initiale en degrés Celsius,
tm = température maximale en degrés Celsius,
a = correction nécessitée par la formation des acides,
b = correction nécessitée par la chaleur de combustion du fil d'allumage,
c = correction de température nécessitée par l'échange de chaleur avec l'extérieur. Celle-ci est nulle si on utilise la jaquette adiabatique,
M = masse de la prise d'essai en gramme
h1 = humidité de l'échantillon sec à l'air en pourcentage en masse 1 déterminée selon la norme M 03-037

➢ Pouvoir calorifique inférieur sur sec à l'air

Il se calcule par convention selon la formule suivante :

$$Iv = Pv - 6 \times 4.1868\ h2 = Pv - 25.1\ h2$$

Où :

Iv en joules par gramme,
h2 étant la teneur en eau totale du combustible sec à l'air en pourcentage (eau préexistante dans ce combustible et eau formée par combustion de l'hydrogène obtenue expérimentalement lors d'une détermination d'hydrogène du combustible selon M 03-037) ou calculée à partir de la formule suivante :

$$h2 = 8.937\ H\ x\ \frac{100 - h1}{100} + h1$$

h1= teneur en hydrogène en pourcentage du combustible sec

Le pouvoir calorifique inférieur d'un combustible dont l'humidité h est différente de l'humidité h1 de l'échantillon analysé, se calcule avec les expressions suivantes :

$$Ivh = Pv\frac{100 - h}{100 - h1} - 6x4.1868\left[\frac{h2 - h1}{100 - h1}(100 - h) + h\right]$$

$$Ivh = (Iv + 6x4.1868h1)\frac{100}{100 - h1} - 6x4.1868h$$

Pour un combustible sec, le pouvoir calorifique est :

$$Ivs = (Iv + 6\ x\ 4.1868\ h1)\frac{100}{100 - h1} = (Iv + 25\ h1)\frac{100}{100 - h1}$$

$$Ivs = Pv\frac{100}{100 - h1} - 54\ x\ 4.1868\ H = Pv\frac{100}{100 - h1} - 224\ H$$

2.4.5 - Coût de la méthode

- **Matériel**

Ce type d'essai ne peut être fait que dans un laboratoire : il faut disposer de gaz (oxygène) et produits chimiques (acide benzoïque, acide chlorhydrique, hydroxyde de baryum, carbonate de baryum).

L'investissement propre à cet essai (bombe calorimétrique, calorimètre et accessoires) **varie de 7 500 € à 15 000 € H.T.** suivant le degré d'automatisation voulue.

La décomposition élémentaire ne peut être réalisée que par des laboratoires très spécialisés disposant de spectromètre de masse (CNRS…).

- **Mesures**

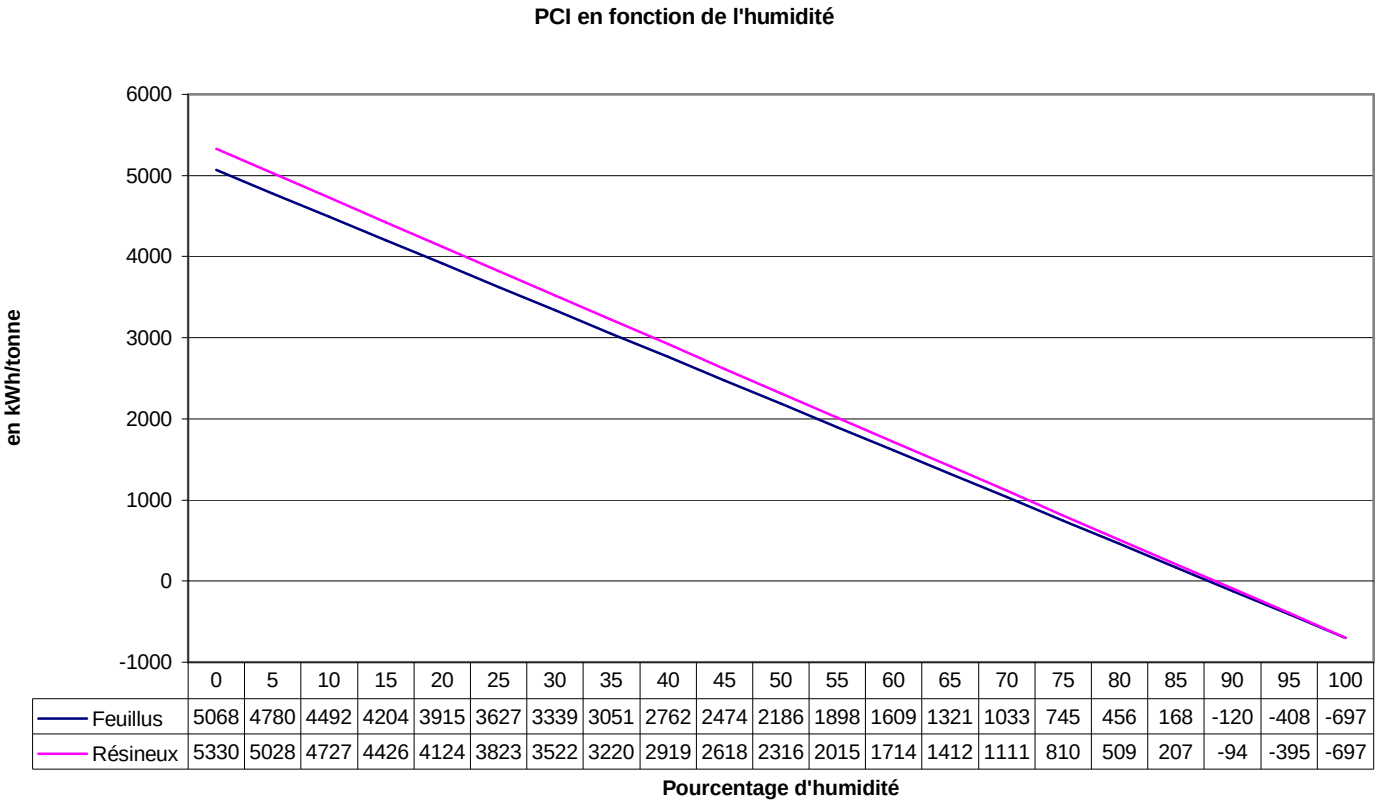
Ce type de mesures réalisées dans un laboratoire coûte généralement **180 € H.T.** dont un quart dû à la décomposition élémentaire

2.5 - Méthode 2 : détermination du PCI a partir de l'humidité

La formule de la variation du PCI en fonction du taux d'humidité est la suivante :

PCI sur brut = PCI sur anhydre x (100 – E)/(100 – 6 E)

On obtient ainsi le graphique suivant :



	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Feuillus	5068	4780	4492	4204	3915	3627	3339	3051	2762	2474	2186	1898	1609	1321	1033	745	456	168	-120	-408	-697
Résineux	5330	5028	4727	4426	4124	3823	3522	3220	2919	2618	2316	2015	1714	1412	1111	810	509	207	-94	-395	-697

Dans les plages d'humidité fréquemment utilisées dans le bois énergie (10% à 65% d'humidité), le PCI varie de 1 370 à 4 610 kWh/tonne soit un facteur 3.4.

On peut ainsi déterminer le PCI d'un combustible par la détermination du type d'essence composant majoritairement le combustible (feuillu ou résineux) employé et par une mesure d'humidité. L'utilisation du graphique ci-dessus permet alors de déterminer le PCI.

2.6 - Synthèse

Méthodes	**Bombe calorimétrique**	**ABAQUE**
Norme(s)	ISO 1928-1995	-
Domaine de validité (% d'humidité)	5 à 95 %	
Prix	Elevé (180 E)	Bon marché (voir mesure d'humidité)
Mise en œuvre	Longue	Rapide (voir mesure d'humidité)
Temps de réponse	Court	Court
Précision	Grande	moyenne
Conservation des propriétés du produit	Non	Oui
Influence de la granulométrie	Non	Non
Influence de la composition	Oui	Oui

HUMIDITE

3 - HUMIDITE

3.1 - Définitions

L'humidité des combustibles bois représente la teneur en eau de ce combustible. L'humidité est une donnée capitale pour la détermination du PCI.

Deux types d'humidité sont employés :
Humidité sur brut : il s'agit du rapport entre la masse d'eau contenue dans le bois et la masse totale du bois
Humidité sur sec : il s'agit du rapport entre la masse d'eau contenue dans le bois et la masse sèche du bois

Correspondance entre les deux expressions de l'humidité :

$$H = \frac{h}{100 + h} \times 100 \qquad h = \frac{H}{100 - H} \times 100$$

Humidité sur brut : H (%)	0	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Humidité sur sec : h (%)	0	11	18	25	33	43	54	67	82	100	122	150

Dans le domaine du bois énergie, on utilise généralement l'humidité sur brut.

3.2 - Méthodes par déshydratation : principe

La mesure est réalisée à partir d'un échantillon de minimum 300 g.

Une pesée de l'échantillon « humide » est réalisée avec une précision supérieure à 0,5 g.

L'échantillon est ensuite déshydraté à une température de 105 °C +/- 5° C.

L'échantillon complètement déshydraté est pesé.

L'humidité en pourcentage est alors donnée par la formule suivante :

$$H = \frac{m_2}{m_1} \times 100$$

dans laquelle

m_1. : masse en grammes de l'échantillon avant séchage
m_2. : masse en grammes de l'échantillon après séchage

A partir de ce principe, le mode de séchage de l'échantillon peut varier : étuvage, micro onde ou infra rouge.

3.3 - Méthode 1 : étuvage

3.3.1 - Mode opératoire

Prendre un échantillon de 500 g environ.

Peser à 0,5 g un plateau vide, propre et sec

Remplir le plateau et étaler l'échantillon, peser l'ensemble à 0,5g

Placer le plateau dans l'étuve à 105°+-5° pendant au moins 5 heures, effectuer une pesée. Replacer le plateau et l'échantillon pour une période d'une heure, puis peser de nouveau, recommencer l'opération jusqu'à ce que ce que la différence de poids entre deux pesées successives soit inférieure à 1 g ou arrêter l'opération au bout de 20 heures.

3.3.2 - Expression des résultats

L'humidité en pourcentage à l'aide de la formule

$$H = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100$$

dans laquelle

m_1 : masse en grammes du plateau vide
m_2. : masse en grammes du plateau et de l'échantillon avant séchage
m_3. : masse en grammes du plateau et de l'échantillon après séchage

3.3.3 - Coût de la méthode

- **Matériel**

La balance : son prix dépend essentiellement de sa précision : de 300 à 450 € pour les balances peu précises. Ce type de balance est admis par la norme européenne en utilisant un échantillon d'environ 2 kg, la précision demandée est de 2g. Le prix atteint les 3 000 € pour les balances de précision de 0,01 g, précision demandée par la norme NF B 51 004.

Le prix de l'étuve varie en fonction de sa taille autour d'un prix moyen de 3 000 €

Les conteneurs à dessiccateur coûtent quelques centaines d'Euros

- **Mesures**

Le coût de la manipulation est lié essentiellement au temps passé. La vérification de la constance du poids nécessite environ 4 à 5 pesées en moyenne, soit un temps de mobilisation d'une personne pour une ou deux heures, soit 45 à 75 € par essais hors coût de structure

3.4 - Méthode 2 : par lampes infra rouge

Cette méthode est réalisée avec un matériel comprenant des lampes infra rouge et une balance.

Les pesées sont automatiques et la déshydratation s'arrête dès qu'elle est complète (quand il n'y a plus de perte de masse par évaporation de l'eau). Ce type d'appareil peut donner directement la valeur de l'humidité de l'échantillon. Les échantillons mesurés ne peuvent généralement pas dépasser 100 g.

Exemple d'appareil à lampes infra rouge :





Cet appareil a un coût de 5 250 € H.T.

3.5 - Méthode 3 : par micro ondes

Cette méthode est rapide (moins de 20 min) mais ***nécessite une présence humaine constante afin d'arrêter le chauffage de l'échantillon dès que le bois présente un début de pyrolyse***. En effet, par micro onde la température du bois n'est pas contrôlée (contrairement à l'étuve) ce qui peut entraîner une inflammation de celui-ci si le chauffage est prolongé.

Il faut donc ouvrir le four toutes les 2 min afin de vérifier l'inflammation, peser et remuer l'échantillon.

3.5.1 - Mode opératoire

Peser le plateau du four à micro-onde.

Prélever une quinzaine de rondelles de quelques millimètres d'épaisseur, les briser et les déposer sur le plateau du four à micro-onde.

Peser l'ensemble.

Déshydrater, dans le four à micro-onde par étapes d'une minute, noter le poids à chaque étape.

Recommencer l'opération jusqu'à l'apparition des taches de pyrolyse, peser l'échantillon et le plateau.

3.5.2 - Expression des résultats

L'humidité est exprimée en pourcentage à l'aide de la formule

$$H = \frac{m_2 - (m_p + m_{p-1})/2}{m_2 - m_1} \times 100$$

dans laquelle
m_1 : masse du plateau
m_2. : masse du plateau et de l'échantillon humide
m_p : masse du plateau et de l'échantillon après apparition des taches de pyrolyse
m_{p-1} : masse du plateau et de l'échantillon lors de la pesée du plateau et de l'échantillon, lors de la pesée précédant l'apparition de tache de pyrolyse.

3.5.3 - Coût de la méthode :

Le four micro onde a un coût de l'ordre de 300 € H.T.
La balance a un coût similaire à celle utilisée dans le cas de l'étuvage.

3.6 - Méthode diélectrique

Un fabricant autrichien PANDIS propose un appareil permettant de mesurer l'humidité d'un échantillon de bois déchiquetés.

Le principe de la mesure est la détermination de la capacité d'un bac rempli de particules de bois. La plaque extérieure est constituée par le revêtement en tôle du bac. Une plaque intérieure isolée est insérée à l'intérieur du bac.



La mesure est effectuée à partir d'un échantillon de 60 à 80 litres de combustible.

Le bois doit être suffisamment finement découpé afin d'éviter un foisonnement trop important.

L'appareil doit être étalonné pour tenir compte de la granulométrie et de la masse volumique apparente. Sa précision la plus grande correspond à la plage 25-30% (sur brut).

Le coût de l'appareil est de 1 800 € H.T.

3.7 - Synthèse

Méthodes	**Pesée et déshydratation**			**Permittivité diélectrique**
	dans une étuve ventilée	*dans un four micro-onde*	*par infra rouge ou source à halogène*	
Norme(s)	ISO 589	Non	Non	Non
Domaine de validité (% d'humidité)	5 à 95 %	5 à 95 %	5 à 95 %	5 à 35 %
Prix **(coût du matériel)**	Moyen (3500 à 5000 E)	Faible (600 à 1600 E)	Assez élevé (5300 E)	Faible (1800 E)
Mise en œuvre	Facile	Facile	Facile	Très facile
Temps de réponse	Long (> 5 heures)	Court (< 20 minutes)	Court (< 1 heure)	Immédiat
Précision	Très grande	Suffisante	Suffisante (mais échantillon de masse faible : < 100 g)	Moyenne (nécessité d'étalonner l'appareil en fonction du type de combustible)
Conservation des propriétés du produit	Non	Non	Non	Oui
Influence de la température				Oui
Influence de la granulométrie	Non	Non	Non	Oui
Influence de la composition	Non	Non	Non	Non

GRANULOMETRIE

4 - GRANULOMETRIE

4.1 - Définition

La granulométrie représente la répartition en classe de la taille des particules composant un combustible. Elle est déterminée par tamisage. Deux méthodes existent.

4.2 - Méthode 1

4.2.1 - Principe

Faire passer à travers des tamis à mailles les éléments pour déterminer la masse comprise entre deux dimensions correspondant aux bornes des classes de distribution.

4.2.2 - Appareillage

Tamis à mailles rondes ou carrées.

Une balance capable de mesurer la masse de l'échantillon à 0,1% près.

4.2.3 - Mode opératoire

L'échantillon total est pesé.

La norme prévoit de commencer par le tamis de 45 mm et de tamiser ensuite le refus, puis le passant de l'échantillon.

L'agitation de l'échantillon est faite à la main.

4.2.4 - Expression des résultats

Il s'exprime en pourcentage de masse de la classe de distribution par rapport à la masse totale.

Il n'est pas demandé de correction pour l'humidité.

4.2.5 - Coût de la méthode

- **Matériel**

600 à 750 € si l'on ne compte que les tamis.

- **Mesures**

En se limitant à deux cribles, on peut estimer à une demi-heure le temps à passer par un opérateur soit 10 à 12 € de frais main d'œuvre hors frais de structure.

4.3 - Méthode 2

4.3.1 - Principe

Faire passer à travers des tamis à mailles les éléments pour déterminer la masse comprise entre deux dimensions correspondant aux bornes des classes de distribution.

4.3.2 - Appareillage

Tamis à mailles circulaires disposées en triangle ayant au minimum les trois dimensions nominales suivantes :

45 mm de diamètre et espacés de 60 mm
15 mm de diamètre et espacés de 22 mm
3 mm de diamètre et espacés de 8 mm.

En cas de besoin, il doit être adjoint des tamis ayant un maillage plus élevé.

Un dispositif vibrant pouvant recevoir l'ensemble des cribles.
Les vibrations ont une amplitude de 70mm et une fréquence de 160 coups à la minute.

Une étuve permettant d'amener le bois à l'état anhydre (voir paragraphe mode opératoire).

Une balance d'une précision de $\pm$ 1g

4.3.3 - Mode opératoire

L'échantillon est déposé dans le crible supérieur. Le système vibratoire est mis en fonctionnement pendant 4 minutes.
Les parties retenues dans chaque crible sont pesées et l'humidité est mesurée.

4.3.4 - Expression des résultats

Il s'exprime en pourcentage de masse anhydre de la classe de distribution par rapport à la masse anhydre totale.

4.3.5 - Coût de la méthode

- **Matériel**

600 à 750 € si l'on ne compte que les tamis.
Il convient également de se procurer un vibrateur.

- **Mesures**

On peut estimer à une demi-heure le temps à passer par un opérateur soit 10 à 12 € de frais main d'œuvre hors frais de structure.

Il faut ajouter quatre mesures d'humidité estimées au minimum à 45 € chacune soit 180 € environ au total.

4.4 - Synthèse

Méthodes	**Méthode 1** **Tamisage** (tamis à mailles rondes ou carrées)	**Méthode 2** **Tamisage** (tamis à mailles circulaires disposées en triangle) puis **mesure d'humidité**
Norme(s)	NF M 03-040	SS 18 71 74
Domaine de validité (% d'humidité)	5 à 95 %	
Prix	Moyen	Elevé
Mise en œuvre	Facile	Lourde
Temps de réponse	Court	Long
Conservation des propriétés du produit	Oui	Non
Influence de la température	Non	
Influence de la composition	Oui	Oui

TAUX DE CENDRES

5 - TAUX DE CENDRES

5.1 - Principe

L'échantillon est incinéré à l'air, suivant un régime de chauffage spécifié, jusqu'à une température de 815 °C ± 10°C et maintenu à cette température jusqu'à l'obtention d'une masse constante.
Le pourcentage des cendres est calculé à partir de la masse du résidu après incinération.

5.2 - Appareillage

L'incinération est obtenue dans un four à moufle permettant d'obtenir des températures supérieures à 800°C. L'échantillon est pesé avec une balance précise à 0.1 mg et placé dans une nacelle en silice, porcelaine ou platine.
Certains laboratoires réalisent une première incinération dans un creuset chauffé par un bec maker avant d'utiliser le four à moufle.

5.3 - Mode opératoire

L'échantillon est d'abord broyé avec une granulométrie inférieure à 200 micromètres puis pesé (masse d'1 ou 2 grammes).

L'échantillon est alors chauffé par paliers jusqu'à 815 °C pendant plusieurs minutes ou plusieurs heures jusqu'à l'obtention de cendres sans présence de points noirs (imbrûlés).

Après refroidissement, l'échantillon est de nouveau pesé.

5.4 - Expression des résultats

Le taux de cendres A, de l'échantillon analysé, exprimé en pourcentage en masse est donné par la formule :

$$A = \frac{m3 - m1}{m2 - m1} x100$$

où :

m1 est la masse de la nacelle en grammes
m2 est la masse de la nacelle et de l'échantillon en grammes
m3 est la masse de la nacelle et des cendres en grammes

Le résultat doit être exprimé à 0.1 points près.

Si H est l'humidité de l'échantillon sec à l'air, le taux de cendres sur sec B est donné par la formule :

$$B = \frac{a\ x\ 100}{100 - H}$$

5.5 - Coût de la méthode

- **Matériel**

Ce type d'essai doit être fait de préférence dans un laboratoire.

L'investissement propre à cet essai (four à moufle, balance, nacelle…) **est de l'ordre de 3000 à 3 750 € H.T.**

- **Mesures**

Ce type de mesures réalisées dans un laboratoire coûte généralement **120 € H.T.**

TAUX D'ECORCE

6 - TAUX D'ECORCE

6.1 - Méthode 1

La méthode consiste à séparer manuellement l'écorce du bois proprement dit et à peser les deux éléments.

Le taux d'écorce s'exprime alors par :

$$t = 100 * P1/(P1 + P2)$$

où
P1 est le poids d'écorce
P2 est le poids de bois proprement dit.

Coût de la méthode

La méthode étant entièrement manuelle est onéreuse dès lors que l'on doit traiter un échantillon important.

6.2 - Méthode 2

Le taux de cendre d'un combustible bois augmente sensiblement avec la présence d'écorce. Aussi, pour déterminer une anomalie en matière de taux d'écorce, on peut s'appuyer sur l'analyse du taux de cendre.

PRECONISATIONS

7 - PRECONISATIONS

Que ce soit pour un fournisseur ou pour un client, la nécessité de mesurer une ou plusieurs caractéristiques d'un combustible bois relève de 2 cas de figure :

1. Le contrôle du respect du cahier des charges d'un combustible
2. La facturation du combustible

7.1 - Contrôle du respect du cahier des charges d'un combustible :

Ce cas se présente soit pour le fournisseur avant une livraison ou lors de la production, soit pour le client avant le dépotage du combustible dans la réserve d'une chaufferie. Ces deux cas nécessitent des méthodes simples, rapides et bon marché que nous allons détailler pour chacune des caractéristiques.

ATTENTION : *sur le site d'une chaufferie, il est très fortement conseillé de garder un échantillon de combustible de chaque livraison effectuée (cette conservation se faisant dans un emballage étanche type « zip lock »). En effet, en cas de doute, la vérification de certaines caractéristiques (notamment le taux de cendre et taux d'écorce) ne peut être effectuée de manière fiable qu'à posteriori (après utilisation du combustible).*

7.1.1 - Prise d'échantillon :

Prélever des échantillons en plusieurs points du tas de combustible à contrôler : en superficie du tas et le plus en profondeur possible. A partir de ces échantillons, on peut :

- Soit les mélanger et tirer un échantillon du mélange devenu homogène,
- Soit mesurer les caractéristiques sur chacun des échantillons prélevés et établir des moyennes des mesures réalisées.

7.1.2 - Humidité :

On préfèrera la méthode par déshydratation en micro onde. Cette méthode est simple, rapide (moins de 20 minutes), fiable quel que soit le type de combustible et peut être appliquée avec un matériel simple et bon marché (four micro onde + balance).

Attention toutefois à bien respecter le protocole de mesure afin de ne pas dépasser le seuil d'inflammation de l'échantillon.

7.1.3 - PCI :

On déterminera le PCI à partir de l'humidité (abaque). On peut affiner la détermination du PCI si l'essence du bois à partir duquel le combustible a été produit est connue.

7.1.4 - Granulométrie :

On cherchera à vérifier deux classes de granulométrie : celle qui dépasse les dimensions maximum tolérées dans le cahier des charges et celle qui constitue « les fines et poussières » (granulométrie < 3 mm).

Pour cela, on préfèrera la méthode par tamisage sans séchage (la granulométrie est exprimée en classe par rapport à la masse totale du combustible « humide »). En effet, cette méthode est plus rapide puisqu'elle ne nécessite pas de séchage.

7.1.5 - Taux de cendre et taux d'écorce :

La mesure du taux de cendre ou du taux d'écorce (les deux notions étant étroitement liées) ne peut être réalisée sans un matériel de laboratoire. Aussi, on procèdera par observation à posteriori des quantités de cendres produites par la chaufferie en fonction de la quantité de combustible consommé. Si la quantité de cendre augmente de manière significative, on procèdera à une mesure du taux de cendre et du taux écorce suivant les méthodes de laboratoire.

A titre indicatif, voici un tableau synthétique donnant les taux d'écorce et de cendres en fonction des essences de bois :

7.2 - Facturation :

Dans le cas où la facturation est réalisée en quantité d'énergie fournie (facturation par kWh PCI livré), il est nécessaire d'avoir une mesure fiable du PCI et du tonnage de combustible livré.

Le PCI peut être déterminer à partir d'une mesure d'humidité par déshydratation en étude ventilée. Cette méthode donnant une mesure très précise de l'humidité, on pourra à partir d'un abaque déterminer le PCI de manière précise. L'incertitude liée à l'essence (si elle n'est pas connue) ne dépassera pas 10 % (chiffre comparable aux hydrocarbures).

Ainsi, à partir de l'humidité (et donc du PCI) et du tonnage de combustible livré, on obtient la quantité d'énergie livrée :

Quantité d'énergie livrée (en kWh) = masse livrée (en tonne) x PCI (en kWh par tonne)