

A D E M E



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

Validation des méthodes de mesures des
caractéristiques
des combustibles bois déchiquetés

ADEME
Critt Bois - Fibois
Mars 2002



SOMMAIRE

Avant propos	4
I / Etude bibliographique sur le calcul du PCI	
1. Pouvoirs Calorifiques d'un Combustible	6
<u>1.1 - Définition</u>	6
<u>1.2 - Détermination du pouvoir calorifique</u>	6
1.2.1 Pouvoir calorifique à volume constant	6
1.2.2 Pouvoir calorifique à pression constante	8
1.2.3 Comparaison des pouvoirs calorifiques Pv et Pp	9
2. Pouvoirs calorifiques supérieurs et inférieurs	10
<u>2.1 - Définition</u>	10
<u>2.2 - Relation entre PCS et PCI</u>	10
<u>2.3 - Calcul approché du pouvoir calorifique</u>	10
<u>2.4 - Autres équations permettant de calculer le PCI et le PCS</u>	11
2.4.1 Calcul du PCS	12
2.4.2 Calcul du PCI	12
<u>2.5 - Combustion neutre ou stœchiométrique</u>	13
2.5.1 Pouvoir comburivore (combustible solide ou liquide)	14
2.5.2 Pouvoir fumigène (combustible solide ou liquide)	14
3. Les normes françaises ou européennes	14
<u>3.1 - La norme NF M 003-05</u>	14
3.1.1 Principe	15
3.1.2 Appareillage	15
3.1.3 Mode opératoire	16
3.1.4 Expression des résultats	17
<u>3.2 - Les normes européennes</u>	18
<u>3.3 - Analyse comparative</u>	19
4. Variation du PCI en fonction de l'humidité	20
5. Utilisation des différentes formules de détermination du PCS et PCI	21
<u>5.1 - Présentation des échantillons</u>	21
<u>5.2 - Présentation des résultats</u>	21
5.2.1 Composition élémentaire des échantillons	21
5.2.2 Mesure du pouvoir calorifique supérieur	21
6. Conclusion sur l'étude bibliographique	23

II / Mesures complémentaires des appareils	
1. Protocole	26
2. Mesures avec le seau Pandis	28
<u>2.1 - Les résultats des tests</u>	28
<u>2.2 - Analyse des données</u>	29
2.2.1 Influence de l'humidité	29
2.2.2 Influence de la granulométrie	32
2.2.3 Influence du type de bois	33
2.2.4 Influence de l'essence	35
<u>2.3. Synthèse et recommandation d'utilisation</u>	36
3. Mesures par le micro-ondes	37
<u>3.1 - Rappel de la méthode micro-ondes</u>	37
<u>3.2 - Les résultats des tests</u>	39
<u>3.3 - Analyse des données</u>	40
3.3.1 Influence de l'humidité	40
3.3.2 Influence de la granulométrie	41
3.3.3 Influence du type de bois	42
3.3.4 Influence de l'essence	43
<u>3.4 - Analyse et conclusion</u>	45
III / Réalisation de fiches pratiques	
Préambule	46
Procédure de contrôle des caractéristiques du combustible bois déchiqueté	47
Fiche 1 = La prise d'échantillons	48
Fiche 2 = Mesure du PCI	50
Fiche 3 = Méthode de référence de mesure de l'humidité (à l'aide d'une étuve)	52
Fiche 4= Mesure de l'humidité à l'aide d'un micro-ondes	53
Fiche 5 = Mesure de l'humidité au seau Pandis FMG 3000	55
Annexe 1 : Bibliographie PCI	57
Annexe 2 : Liste des spécifications techniques (TS)	60

Avant propos

Cette réflexion fait suite au travail déjà effectué sur les mesures des caractéristiques des combustibles bois qui visait à recenser et évaluer les méthodes existantes. Ce travail avait été effectué dans le cadre d'un partenariat ADEME, FIBOIS Ardèche-Drôme, CRITT BOIS et CTBA.

Plusieurs interrogations se sont posées et ont nécessité de nouvelles investigations :

1. La première était sur la mesure du PCI. Beaucoup de méthodes existent et il s'avérait nécessaire de réaliser une étude bibliographique poussée. (partie 1 du rapport)
2. La deuxième porte sur la validité de l'un des appareils de mesure d'humidité (mesure par résistivité électrique) : matériel développé par une entreprise autrichienne PANDIS le FMG 3000.
Afin d'affiner les conclusions du premier rapport sur cet appareil, de nouveaux tests vont être effectués. Ces essais devraient permettre de vérifier la validité de cet appareil. En effet de nouveaux critères seront vérifiés (humidité, granulométrie, partie de l'arbre utilisée pour produire la plaquette, essence). (Partie 2 du rapport)
3. La troisième porte sur la validité de la méthode de mesure au micro-ondes. Des essais ont aussi été réalisés pour affiner les conclusions. (Partie 2 du rapport)

Ce rapport est le résultat de l'étude menée à nouveau par l'ADEME en partenariat avec FIBOIS et le CRITT BOIS pour répondre à ces interrogations.

Réalisation et rédaction de l'étude :

FIBOIS Ardèche - Drôme : Boris BOUCHER et Frédéric LOURDAIS
CRITT BOIS : Benoît WILLMANN

Coordination technique et financement de l'étude :

ADEME : Christophe BAREL

I / ETUDE BIBLIOGRAPHIE SUR LE CALCUL DU PCI

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

Deux types de pouvoir calorifique peuvent être déterminés :

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète, sous pression atmosphérique normale, de l'unité de quantité de combustible. Le combustible, l'air de combustion et les produits de combustion sont ramenés à 0°C.

On distingue le **pouvoir calorifique supérieur (PCS)** quand l'eau résultant de la combustion est ramenée à l'état liquide dans les produits de combustion (chaudière à condensation).

Le **pouvoir calorifique inférieur (PCI)** prend en compte la chaleur latente de vaporisation de l'eau qui reste à l'état de vapeur dans les produits de combustion.

1. Pouvoirs Calorifiques d'un Combustible

1.1 - Définition

Nous appelons pouvoir calorifique d'un combustible, la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète sous pression atmosphérique normale de 1,013 bars, de l'unité de quantité de ce combustible (**1 kg s'il s'agit de bois**, 1 m³ s'il s'agit de gaz), le combustible et l'air étant à 0°C et les produits de combustion ramenés à 0°C.

L'unité légale de quantité de chaleur est le **Joule**, mais, pour des raisons d'échelle, l'unité pratique est le kilowattheure.

L'unité de masse pour les combustibles liquides et solides est le kg.

L'unité de volume pour les combustibles gazeux est le mètre cube qu'il faut considérer dans les conditions normales de température et de pression, soit 0°C et 1,013 bars.

1.2 - Détermination du pouvoir calorifique

Du point de vue de la thermodynamique, on peut définir différentes grandeurs du pouvoir calorifique suivant qu'il est défini à volume constant, à pression constante et si l'on tient compte ou non de la chaleur latente de vaporisation de l'eau.

1.2.1 Pouvoir calorifique à volume constant

Le pouvoir calorifique P_v d'un combustible B est la grandeur définie par la relation, sous forme massique (ou molaire) :

$$P_v = \frac{U_{M0} - U_{Rc0}}{M_b} \quad \text{en } \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

où :

- U_{M0} énergie interne du mélange initial M, dans les conditions de références P_0 , T_0 ($P_0 = 1,01325$ bars et $T_0 = 25^\circ\text{C}$),
- U_{Rc0} énergie interne des produits finaux de combustion R_c , résultant d'une combustion complète, dans les mêmes conditions de référence,
- M_b masse du combustible B en kg.

Détermination expérimentale

Le pouvoir calorifique est pratiquement égal à l'énergie chaleur rapportée à l'unité de masse du combustible B, qu'il faut extraire d'un système fermé qui est le siège d'une combustion complète, à volume constant, afin de ramener la température finale des produits de combustion à la température initiale T_0 du mélange avant combustion.

Le premier principe de la thermodynamique donne : $\Delta U = \Delta W + \Delta Q$ où ΔW représente la variation des forces extérieures (travail) et ΔQ la variation de la quantité de chaleur. Les conditions expérimentales fixent les conditions particulières :

- Enceinte indéformable : $\Delta E = 0$,
- Etat de repos initial et final : $0,5 \times \Delta C^2 = 0$,
- Pas de déplacement vertical : $\Delta Z = 0$.

Il n'y a pas de variation de travail, d'où dans ces conditions :

$$Q = U = U_M(P_0, T_0) - U_{Rc}(P_{Rc}, T_0)$$

En faisant l'hypothèse que les produits de combustion se comportent comme des gaz semi-parfaits, leur énergie interne est quasiment indépendante de la pression.

D'où $U_{Rc}(P_0, T_0) = U_{Rc}(P_{Rc}, T_0)$

En divisant par la masse de combustible M_B , il vient :

$$q_v = \frac{Q}{M_B} = \frac{U_{M0} - U_{Rc0}}{M_B}$$

Cette égalité est à la base de la détermination expérimentale des pouvoirs calorifiques à l'aide de la **bombe calorifique de Mahler**.

Le pouvoir calorifique défini par cette dernière expression est indépendant de la forme sous laquelle se présente le comburant (oxygène pur ou air) ainsi que sa quantité, pourvu que cette dernière soit suffisante pour assurer une combustion complète.

1.2.2 Pouvoir calorifique à pression constante

Le pouvoir calorifique P_p d'un combustible est la grandeur définie par la relation

$$P_p = \frac{H_{M0} - H_{Rc0}}{M_b} \quad \text{en } \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

avec :

- H_{M0} enthalpie du mélange initial M, dans les conditions P_0, T_0 ,
- H_{Rc0} enthalpie des produits finaux de combustion résultant d'une combustion complète et dans les mêmes conditions de références,
- M_B masse du combustible.

Détermination expérimentale :

Le pouvoir calorifique coïncide avec l'énergie chaleur q_p qu'il faut extraire (rapportée à l'unité de masse du combustible B), d'un système fermé qui est le siège d'une combustion complète isobare, afin de ramener la température finale des produits de combustion R_c à la température initiale T_0 du mélange M avant combustion.

Les relations établies à volume constant sont toujours valables. Mais dans le cas présent, le système reçoit de l'énergie travail.

Le premier principe donne :

$$Q_p = -\Delta U - P_0 \times \Delta V = -\Delta(U + VP) = \Delta U - V\Delta P - P\Delta V$$

$V\Delta P = 0$ car $P = \text{cst}$
hors $H = U + VP$

$$Q_p = -\Delta H = H_M(P_0, T_0) - H_{RC}(P_0, T_0)$$

$$\text{D'où } k_p = \frac{Q_p}{M_B} = \frac{H_{M0} - H_{Rc0}}{M_B}$$

Remarque : Le pouvoir calorifique P_p coïncide également avec l'énergie chaleur q_B rapportée à l'unité de masse du combustible B, qu'il faut extraire d'un système ouvert, en régime permanent, qui est le siège d'une combustion complète isobare, afin que les produits de combustion R_c sortent à la même température T_0 que celle à laquelle entre le mélange M.

1.2.3 Comparaison des pouvoirs calorifiques Pv et Pp

$$\begin{aligned}\Delta H_0 &= H_{M0} - H_{Rc0} = U_{M0} - U_{Rc0} - (V_{Rc0} - V_{M0}) \times P_0 \\ &= \Delta U_0 - (V_{Rc0} - V_{M0}) \times P_0\end{aligned}$$

$$\text{soit : } \Delta U_0 - \Delta H_0 = (V_{Rc0} - V_{M0}) \times P_0 = P_v - P_p$$

Cette relation s'exprime sous deux formes suivant la nature du combustible :

✪ *Combustible solide ou liquide :*

Si nous négligeons le volume de combustible B par rapport au volume de l'air, la relation précédente devient :

$$\Delta U_0 - \Delta H_0 = (V_{Rc0} - V_{M0}) \times P_0$$

$$\text{en posant } \chi = \frac{V_R}{V_M} = \frac{M_R^*}{M_M^*} = \frac{M_R^0}{M_M^0}$$

$$\Delta U_0 = \frac{U_{M0} - U_{Rc0}}{M_B} \quad \Delta H_0 = \frac{H_{M0} - H_{Rc0}}{M_B}$$

$$P \times V = M \times R \times T$$

$$\Rightarrow \Delta U_0 - \Delta H_0 = (M_{Rc}^* - M_L^*) RT_0 = (\chi - 1) M_L^* RT_0$$

M_{Rc}^* et M_L^* sont respectivement les rapports de gaz de combustion et d'air exprimé en kmoles/kg.

Nous constatons que la différence des pouvoirs calorifiques dépend essentiellement de χ , c'est à dire de la variation du nombre de kilomoles de gaz. En effet si :

$$M_{Rc}^* \leq M_L^* \Rightarrow \chi \leq 1 \text{ et } P_v \leq P_p$$

Dans le cas où le nombre de kilomoles de gaz Rc est le même que celui de kilomoles d'air L, les rapports $\chi = 1$ et les pouvoirs calorifiques sont égaux. Il n'y a ni variation de pression lorsque la combustion est isochore ni variation de volume lorsqu'elle est isobare.

✪ *Combustible gazeux :*

La relation devient :

$$\Rightarrow \Delta U_0 - \Delta H_0 = (M_{Rc}^* - M_L^*) RT_0 = (\chi - 1) M_L^* RT_0$$

Cette relation donne lieu au même commentaire que pour un combustible solide ou liquide. Expérimentalement, il a été démontré que l'écart demeure faible et reste inférieur à 1%. On peut donc confondre les deux pouvoirs calorifiques.

2. Pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur

2.1- Définition

Les pouvoirs calorifiques supérieurs d'un combustible sont les grandeurs P_p et P_v , lorsque l'eau contenue dans les produits de combustion se présente sous forme de liquide.

Les pouvoirs calorifiques inférieurs d'un combustible sont les grandeurs P_p et P_v lorsque l'eau contenue dans les produits de combustion se présente sous forme gazeuse.

2.2 - Relation entre PCS et PCI

La chaleur latente de vaporisation de l'eau est 44,03 kJ/mole.

$$\text{PCS} = \text{PCI} + 44,03 \times N$$

N : nombre de moles d'eau produites par la combustion.

L'écart entre PCS et PCI pour un combustible solide (charbon) est compris entre 2 et 4 %.

Application pour le bois énergie :

La teneur en hydrogène dans les feuillus est comprise entre 5,5 % et 6,5 % ce qui représente un nombre de moles d'eau produites par la combustion du bois de 27,5 à 32,5 moles.

L'écart entre le PCS et le PCI pour le bois anhydre (feuillus) est compris entre 7 % à 8 %

2.3 - Calcul approché du pouvoir calorifique

Il s'obtient avec une certaine approximation en utilisant la règle des mélanges, car les chaleurs de formation sont faibles vis à vis des chaleurs de réaction. L'analyse élémentaire donne les teneurs massiques.

Hypothèse : Tout l'oxygène est déjà combiné chimiquement, dans le combustible, avec de l'hydrogène. La teneur en eau concerne uniquement l'eau de constitution, c'est à dire l'eau qui est mélangée physiquement au combustible.

$$\begin{aligned} \text{PCS} &= [C] \times \Delta h_{0C} + \left\{ [H_2] - \frac{1}{8} [O_2] \right\} \times \Delta h_{0H_2} + \Delta h_{0S} \times [S] - q_{\text{vap}} \times \left\{ [H_2O] + \frac{9}{8} [O_2] \right\} \\ &= \text{enthalpie C} + \text{enthalpie H}_2 + \text{enthalpie S} - \text{eau} \end{aligned}$$

soit :

$$n^{\circ} 1 : \quad \text{PCS}_v = 32760 \times [C] + 120000 \times \left\{ [H_2] - \frac{1}{8} [O_2] \right\} + 9250 \times [S] - 2445 \times \left\{ [H_2O] + \frac{9}{8} [O_2] \right\}$$

Le PCS est ainsi donné en kJ/kg de combustible et l'approximation qui est faite est inférieure de 2% pour le charbon.

Application pour le bois énergie :

L'approximation qui est faite dans cette formule ne se révèle pas optimale pour le matériau bois. L'écart moyen obtenu en comparant la méthode de détermination du PCS à l'aide de la bombe calorimétrique et la formule présentée ci dessus est de l'ordre 15% (Tableau 1) Cette formule ne pourra pas être retenue pour déterminer le pouvoir calorifique inférieur du bois.

Echantillon ¹	Calorimètre	Formule approchée	Ecart
1	17 619	15 000	15 %
2	17 518	15 350	12 %
3	17 422	15 607	10 %
4	18 133	15 115	17 %
5	19 019	14 623	23 %
6	18 714	15 469	17 %
7	19 780	14 289	28 %

Tableau 1 : PCS de différents échantillons en kJ/kg

2.4 - Autres équations permettant de calculer le PCI et le PCS

Bien que la littérature ne soit pas très riche dans le domaine de la détermination du pouvoir calorifique en fonction de la composition élémentaire du combustible, nous avons pu relever quelques formules qui seront testées et comparées à la formule fournie dans la norme française NF M 03-005 dans le *paragraphe 5*.

¹ nature des échantillons en paragraphe 5.1

2.4.1 Calcul du PCS

Formule de Dulong :

$$\text{PCS} = 4,18 \times (78,4 \times C + 241,3 \times H + 22,1 \times S) \quad \text{en kJ.kg}^{-1}$$

Formule de Dulong modifiée :

$$\text{PCS} = 4,18 \times \left(78,4 \times C + 241,3 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) + 22,1 \times S \right) \quad \text{en kJ.kg}^{-1}$$

Formule de Vandralk :

$$\text{PCS} = 4,18 \times (85 \times C + 270 \times H + 26 \times (S - O)) \quad \text{en kJ.kg}^{-1}$$

Formules approchées :

$$n^{\circ}2 : \quad \text{PCS} = 3,6 \times (108 \times C) \quad \text{en kJ.kg}^{-1}$$

$$n^{\circ}3 : \quad \text{PCS} = 3,6 \times (105,5 \times C - 64) \quad \text{en kJ.kg}^{-1}$$

2.4.2 Calcul du PCI

Formule direct :

$$\text{PCI} = 4,18 \times (94,19 \times C - 0,5501 - 52,14 \times H) \quad \text{en kJ.kg}^{-1}$$

Formule de Cragoe :

$$\text{PCI} = (46,704 - 8,802 \times \rho^2 + 3,167 \times \rho) \times [1 - 0,01 \times (S + E + C)] + 0,094 \times S - 0,024 \times E$$

en MJ.kg⁻¹

- avec :
- ρ = masse volumique en kg.l⁻¹,
 - E = teneur en eau,
 - C = teneur en cendres,
 - S = teneur en soufre.

Autre formule :

$$PCI = PCS - 60,5 \times H$$

$$PCI_v = PCS_v - 25 \times h - 226 \times H \quad \text{en kJ.kg}^{-1}$$

$$PCI_p = 4,18 \times PCS_p - 2533,008 \times (9 \times H + h) \quad \text{en kJ.kg}^{-1}$$

où:

- h est l'humidité en %,
- H est le pourcentage massique d'hydrogène,
- C est le pourcentage massique de carbone.

2.5 - Combustion Neutre ou Stœchiométrique

2.5.1 Pouvoir comburivore (Combustible solide ou liquide)

◆ Formule théorique (V_a en Nm^3 d'air/ kg de combustible)

$$V_a = 0,0896 \times [C] + 0,2685 \times [H] + 0,0335 \times [S - O]$$

[-] représente la teneur massique des composants exprimée en %

Exemple : Calcul du coefficient de carbone $C + O_2 \rightarrow CO_2$

12g de carbone + 32g oxygène donnent 22,4 litres de CO_2

les 32g d'oxygène représentent 20,8% du volume d'air nécessaire soit

$$V_a = \frac{22,4 \times 100}{20,8} \times \frac{1}{12} \times [C] = 0,0895 \times [C]$$

◆ Formule mémo-technique (M. VERON)

$$V_a = \frac{PCI}{4180} \quad \text{Nm}^3 \text{ d'air/kg de combustible}$$

Remarque : dans cette relation, le PCI est exprimé en kJ.kg^{-1}

Cela correspond à la loi de Velter : la chaleur dégagée par la combustion est proportionnelle à la quantité d'oxygène absorbée.

2.5.2 Pouvoir fumigène (Combustible solide ou liquide)

- ◆ Formules théoriques

Pouvoir fumigène sur fumées humides (Vfa en Nm³ de fumées/kg de combustible) :

$$V_{fa} = 0,08947 \times [C] + 0,3244 \times [H] + 0,03355[S] - 0,0266[O] + 0,008 \times [N] + 0,0124 \times [\text{eau}]$$

Pouvoir fumigène sur fumées sèches (V'fa en Nm³ de fumées/kg de combustible)

$$V'_{fa} = 0,08947 \times [C] + 0,3244 \times [H] + 0,03355[S] - 0,0266[O] + 0,008 \times [N]$$

- ◆ Des formules mémo-techniques sont applicables si les combustibles ne contiennent pas ou peu de stériles (cendres, eau liée, minéraux).

$$V_{fa} = \frac{PCI}{3553} \quad \text{Nm}^3 \text{ de fumées/kg de combustible}$$

$$V'_{fa} = \frac{PCI}{4180} \quad \text{Nm}^3 \text{ de fumées/kg de combustible}$$

Remarque : dans ces relations, le PCI est exprimé en kJ.kg⁻¹

3. Les normes françaises et européennes

La plupart de ces normes sont issues de la norme ISO, c'est pourquoi nous ne présenterons en détail que la norme française.

3.1 - La norme NF M 003-05

La détermination du pouvoir calorifique supérieur et le calcul du pouvoir calorifique inférieur sont définis par la norme NF M 03-005, datant de décembre 1990 et rédigé pour le charbon.

Application pour le bois énergie :

Cette méthode de détermination du pouvoir calorifique supérieur du bois présentée ci dessous est actuellement utilisée au CRITT BOIS, elle servira de référence pour comparer les différentes formules de détermination du PCS et PCI trouvées dans la littérature (*paragraphe 5*).

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 de la décomposition élémentaire du bois.

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 d'un diamètre maximum de 25 mm 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.

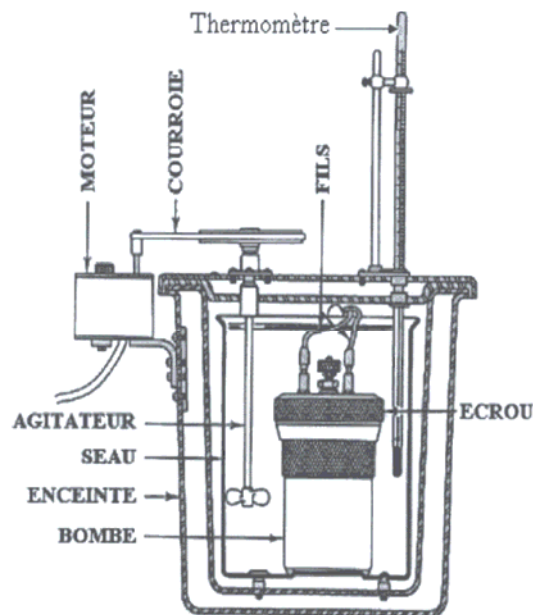


Figure 1 : bombe calorimétrique

3.1.3 Mode opératoire

Dans un premier temps, l'appareillage est étalonné avec une pastille d'acide benzoïque pour déterminer la capacité calorifique de la bombe calorimétrique ou du 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.

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).

Les corrections peuvent être négligées si les mesures de température ne peuvent pas être effectuées avec une précision supérieure au centième de degrés.

Expression des résultats

◆ Pouvoir calorifique supérieur :

Le pouvoir calorifique supérieur est déterminé par la formule suivante :

$$PCS = \frac{(4,1868 \times E) \times (tm - t_i + c) - (a + b)}{M}$$

Le pouvoir calorifique supérieur à volume constant sur sec s'obtient par :

$$PCS_s = PCS \times \left(\frac{100}{100 - h_1} \right)$$

Dans laquelle :

- E = équivalent en eau du calorimètre de la bombe, de leurs accessoires et de l'eau introduite dans la bombe,
- t_i = 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,
- h_1 = 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 :

$$PCIs = Pv - 6 \times 4,1868 \times h_2 = Pv - 25,1 \times h_2$$

Où :

- PCIs en joules par gramme,
- h_2 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 :

$$h_2 = 8,937 H \times \frac{100 - h_1}{100} + h_1$$

- h_1 = teneur en hydrogène en pourcentage du combustible sec

Le pouvoir calorifique inférieur d'un combustible dont l'humidité h est différente de l'humidité h_1 de l'échantillon analysé, se calcule avec les expressions suivantes :

$$PCIh = P_v \frac{100-h}{100-h_1} - 6 \times 4,1868 \left[\frac{h_2-h_1}{100-h_1} (100-h) + h \right]$$

$$PCIh = (I_v + 6 \times 4,1868 \times h_1) \frac{100-h}{100-h_1} - 6 \times 4,1868 \times h$$

Pour un combustible sec, le pouvoir calorifique est :

$$PCIs = (I_v + 6 \times 4,1868 \times h_1) \frac{100}{100-h_1} = (I_v + 25 \times h_1) \frac{100}{100-h_1}$$

$$PCIs = P_v \frac{100}{100-h_1} - 54 \times 4,1868 H = P_v \frac{100}{100-h_1} - 224 H$$

3.2 - Les Spécifications Techniques européennes (TS)

Certains facteurs comme la prise d'échantillons, le taux d'humidité et la composition élémentaire des plaquettes de bois déchiqueté doivent être définis de façon systématique et rigoureuse en utilisant les normes européennes présentées ci dessous. L'ensemble de ces facteurs intervient dans la détermination du pouvoir calorifique du bois déchiqueté.

Pour exemples :

Titre	Référence
Détermination du taux d'humidité	CEN/TC 335
Méthode de réduction des échantillons	CEN/TC 335
Détermination de la composition élémentaire	CEN/TC 335
Prise d'échantillons lors de livraisons par camion	CEN/TC 335
Méthodes de prise d'échantillons	CEN/TC 335

Tableau 2 : Récapitulatif des projets de TS européennes

Tous les pays européens n'ont pas de normes sur la détermination du pouvoir calorifique. Les normes et méthodes recensées sont les suivantes :

Pays	Références	Type
Internationale	ISO 1928-1995	Norme
France	NF M 03-005	Norme
Allemagne	DIN 51 900	Norme
Finlande	-	Méthode
Suède	SS 18 71 82	Norme
Pays bas	NEN ISO 1928 BPM 4-04	Norme Méthode
Grande Bretagne	BS 1016:part 16 :1981	Méthode
Tchécoslovaquie	CSN ISO 1928	Norme
<i>Etats Unis</i>	<i>ASTM D 2015</i> <i>ASTM D 1989</i> <i>ASTM D 3286</i>	<i>Norme</i> <i>Norme</i> <i>Norme</i>

Tableau 3 : Norme européenne sur la détermination du pouvoir calorifique

3.3 - Analyse comparative

Toutes les normes sont très proches entre elles de la norme NF M 003-05, elles utilisent la même trame et le même type de matériel:

- étalonnage du calorimètre
- combustion dans une bombe calorimétrique en présence d'oxygène
- mesure de température avant et après la combustion,
- détermination du PCS,
- calcul du PCI après analyse élémentaire de l'échantillon

Ces essais doivent impérativement être couplés avec une mesure d'humidité.

Il existe une autre méthode utilisant le pouvoir comburivore (quantité d'air nécessaire pour une combustion complète d'un combustible) présentée dans le *paragraphe 2.5*. La détermination de cette donnée nécessite un appareil très spécifique : le cône calorimétrique.

Cet appareil, utilisé par les laboratoires sécurité incendie, nécessite un investissement très important, son coût de fonctionnement est lui aussi élevé.

Une mesure du taux d'humidité (**voir TS du TC 335**) et une décomposition élémentaire (**norme CEN/TC 335**) sont indispensables pour déterminer le pouvoir calorifique du bois. Les modes opératoires de ces projets de TS sont très proches de ceux des normes françaises (*M 03-037*). Ces TS apportent entre autre des spécifications, propres au bois déchiqueté.

4. Variation du PCI en fonction de l'humidité

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

$$\text{PCI sur brut} = \text{PCI sur anhydre} \times (100 - E/100) - 6 E$$

Sur la base des PCI anhydres moyens des résineux et des feuillus, les valeurs sont les suivantes :

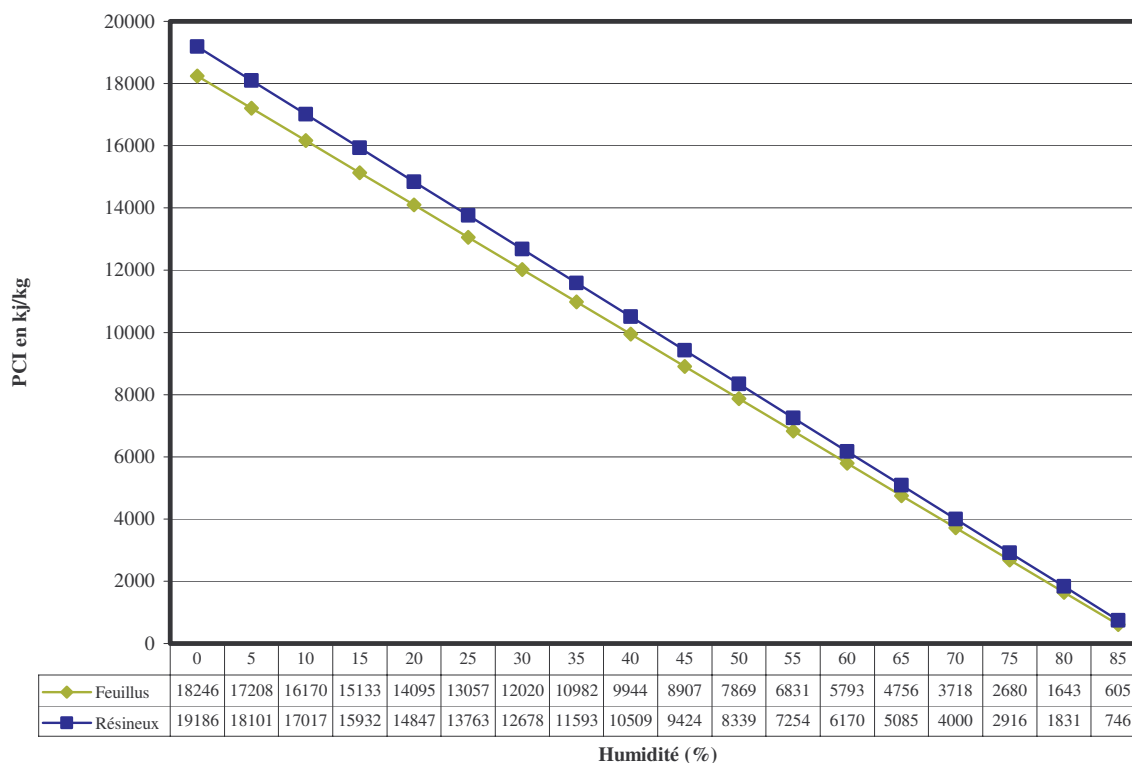


Figure 2 : Pouvoir calorifique inférieur en fonction de l'humidité

Dans les plages d'humidité fréquemment rencontrées dans le bois-énergie (10% à 65% d'humidité), le PCI varie de 4 760 à 16 170 kJ/kg soit un facteur 3,4.

L'influence de l'humidité est donc très importante sur le PCI brut.

5. Utilisation des différentes formules de détermination du PCS et PCI

5.1 - Présentation des échantillons

- **1** : Palettes broyées du 02/02/01, chaudière SECCACIER, origine de la chaufferie ND de MILLIERES ;
- **2** : Sciure du 7/02/01, chaudière, origine de la chaufferie ;
- **3** : Plaquettes forestières du 14/02/01, chaudière KOB, origine de la chaufferie MORVON ;
- **4** : Briquettes de copeaux du 22/02/01, chaudière COMAFER, origine de la chaufferie CEZERIAT Menuiserie de près de Brou, (masse volumique 870 kg/m³) ;
- Trois échantillons (**5** hêtre, **6** bois forêt et **7** chêne) de bois massif ont été testés.

Pour les sept échantillons nous réaliserons une mesure de pouvoir calorifique.

5.2 - Présentation des résultats

5.2.1 Composition élémentaire des échantillons

	C %	H %	O %	N %
1	48,38	5,92	44,96	0,3
2	48,95	6,05	44,92	0,3
3	48,99	6,21	44,63	0,3
4	48,72	5,97	45,28	0,38
5	46,92	6,18	46,15	0,1
6	48,76	6,09	44,17	0,47
7	46,96	5,48	43,37	0,36

Tableau 4 : Composition élémentaire des échantillons

5.2.2 Mesure du pouvoir calorifique supérieur

⊛ Détermination de la capacité calorifique du calorimètre :

Le PCS de l'acide benzoïque est de 26,41 kJ/g, Un gramme d'acide benzoïque a été brûlé dans la bombe, (voir norme NF M 03-005 paragraphe 3)

- T₁ = 23,64 °C
- T₂ = 26,32 °C
- ΔT = 2,68 °C

$$C = 26,41/2,56 = 10,32 \text{ kJ/}^\circ\text{C}$$

✧ *Détermination du PCS :*

A partir de la composition élémentaire des différents échantillons, nous avons calculé pour chaque formule présentée dans le *paragraphe 2-4-1* le pouvoir calorifique supérieur des échantillons.

	Calorimètre	Dulong	Ecart (%)	Dulong Modif	Ecart (%)	Vandralek	Ecart (%)	Approchée n°2	Ecart (%)	Approchée n°3	Ecart (%)
1	17 619	21 824	24%	16 156	8%	18 986	8%	18 810	7%	18 144	3%
2	17 518	22 146	26%	16 482	6%	19 337	10%	19031	9%	18 360	5%
3	17 422	22 317	28%	16 691	4%	19 562	12%	19 047	9%	18 376	5%
4	18 133	21 987	21%	16 277	10%	19 128	5%	18 942	4%	18 273	1%
5	19 019	21 611	14%	15 792	17%	18630	2%	18 242	4%	17 589	7%
6	18 714	22 121	18%	16 553	11%	19 395	4%	18 957	1%	18 288	2%
7	19 780	20 917	6%	15 449	22%	18 158	8%	18 258	8%	17 605	8%

Tableau 5: récapitulatif des PCS en kJ/kg

On observe des écarts importants sur la valeur du PCS suivant le type de formules utilisées. La formule de Vandralek et les formules approchées n°2 et n°3 donnent la valeur du PCS qui se rapproche le plus de la valeur obtenue par la méthode de la bombe calorimétrique (*Norme NF M 03-005*).

✧ *Détermination du PCI anhydre :*

La détermination du PCI anhydre est réalisée à partir des valeurs du PCS (*Tableau 5*) et des formules présentées dans le *paragraphe 2-4-2*.

Noter qu'une de ces formules permet de déterminer le PCI directement à partir de la composition élémentaire du bois.

	Calorimètre	Dulong	Ecart	Dulong Modif	Ecart	Vandralek	Ecart	Direct	Ecart	Approchée n°2	Ecart	Approchée n°3	Ecart
1	16 289	20 495	26%	14 826	9%	17 656	8%	17 757	9%	17 520	7%	16 854	3%
2	16 160	20 787	28%	15 123	6%	17 978	11%	17 953	11%	17 714	10%	17 043	5%
3	16 030	20 925	30%	15 299	4%	18 170	13%	17 932	12%	17 694	10%	17 023	6%
4	16 795	20 649	23%	14 939	11%	17 790	6%	17 878	6%	17 642	5%	16 973	1%
5	17 631	20 223	15%	14 404	18%	17 243	2%	17 125	3%	16 896	4%	16 243	8%
6	17 347	20 754	20%	15 186	12%	18 028	4%	17 870	3%	17 631	2%	16 962	2%
7	18 551	19 688	6%	14 220	23%	16 929	9%	17 293	7%	17 064	8%	16 411	12%

Tableau 6: récapitulatif des PCI anhydres en kJ/kg

Les résultats obtenus avec la formule de Vandralek, la méthode directe et les formules approchées n°2 et n°3 sont identiques aux erreurs de mesures près. Quel que soit le type d'échantillons utilisés, les variations du PCI ne sont pas significatives et ne nécessitent pas la détermination systématique de la composition élémentaire du bois.

✪ Détermination du PCI brut :

L'utilisation de la formule du *paragraphe 4* permet de déterminer la variation du PCI en fonction du taux d'humidité du combustible. Contrairement aux critères de l'essence, l'humidité du combustible influence fortement la valeur du pouvoir calorifique inférieur, comme le montre la *figure 2*.

6. Conclusion sur l'étude bibliographique

Il existe de nombreuses formules plus ou moins empiriques qui permettent de déterminer en fonction de la composition élémentaire de l'échantillon le pouvoir calorifique supérieur ou le pouvoir calorifique inférieur anhydre(cf. tableau de synthèse p25). Dans la plupart des cas il est difficile de savoir comment ont été déterminés les coefficients de ces expressions.

Si l'on compare les résultats fournis par ces formules à la valeur du PCI obtenue par la méthode décrite dans la norme française qui utilise une bombe calorimétrique, on s'aperçoit que l'on peut avoir un facteur deux entre les valeurs extrêmes du PCI.

- ◆ La formule de Vandarlek permet d'obtenir des résultats proches de ceux fournis par la méthode de la bombe calorimétrique. Cependant le coût de cette méthode est relativement élevé (200 € H.T.) et correspond plus à une **technique de laboratoire**.
- ◆ La méthode "direct" et les formules approchées n°2 et n°3 permettent de déterminer quant à elles, le pouvoir calorifique inférieur avec une précision acceptable ($\pm 7\%$) pour un coût d'essais (70 € H.T.) qui est le plus faible des méthodes utilisées. Ces méthodes de détermination direct du PCI sont plus **adaptées pour une utilisation sur site dans le cadre du Bois Energie**.

Sur l'ensemble des documents rassemblés et des essais réalisés au Critt Bois, il semble important de souligner que le facteur prédominant dans la détermination du PCI est **l'humidité du combustible**. L'essence du bois a quant à elle, une influence limitée par

rapport à la précision des mesures qu'il est possible de réaliser lors de la livraison de combustible bois. Enfin, la composition élémentaire des échantillons utilisée pour les essais reste relativement constante (voir tableau 8).

Elément	Teneur massique (en %)
C	46 < [] < 49
H	5 < [] < 7
O	43 < [] < 46
N	0 < [] < 0,5
Cendres	0,2 < [] < 1

Tableau 8 : composition élémentaire des échantillons testés

Application pour le bois énergie :

Dans le cadre de l'utilisation de PCI brut du bois pour déterminer la qualité du combustible livré, il semble raisonnable d'utiliser une valeur moyenne du PCI anhydre en fonction de l'essence ou du type d'essence et d'appliquer une correction liée à l'humidité du combustible. L'humidité du combustible est une caractéristique qu'il est possible de mesurer de façon simple, rapidement, à un faible coût.

Evaluation des différentes méthodes et formules de détermination du PCI

Méthode de détermination du PCI	Calorimètre	Formule approchée 1	Formule approchée 2*	Formule approchée 3*	Formule direct*	Formule de Dulong	Formule de Dulong modifiée	Formule de Vandraleck	Formule de Cragoe	
Donne le PCI ou d'abord le PCS Rappel : PCI = PCS - 60,5 x H	PCI	PCS	PCS	PCS	PCS	PCS	PCS	PCS	PCS	
	Analyse élémentaire ¹ à réaliser	C	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
		H	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
		O	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
		N	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non
		S	Oui	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
Taux de cendre ²	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	
Masse volumique ³	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	
Précision	Référence	± 11%	± 7 %	± 5 %	± 8 %	± 24 %	± 10 %	± 7 %		
Coût indicatif en € HT de la mesure du PCI d'un échantillon	200	140	70	70	70	105	140	140	200	

*Ces trois méthodes sont simples, économiques (seulement 2 analyses élémentaires C et H sont nécessaires) et ont une bonne précision.

¹ coût indicatif de l'analyse d'un élément 35 € H.T.

² taux de cendre 70 € H.T.

³ masse volumique 70 € H.T.

II / MESURES COMPLEMENTAIRES DES APPAREILS

1. Protocole

Critères des échantillons bois

Quatre critères principaux du bois et leurs variantes sont prises en compte : la granulométrie, l'humidité, l'essence et la partie utilisée de l'arbre.

◆ La Granulométrie

La plaquette peut être définie suivant trois dimensions : Longueur, largeur, épaisseur

Pour ces tests deux catégories de granulométrie différentes sont utilisées :

➤ Petite granulométrie taille maximale : 30mm/15 mm /05mm

➤ Granulométrie forte taille maximale : 100mm/60mm/20mm

Elles sont représentatives des différentes plaquettes forestières actuellement sur le marché. Chacune d'entre elles est produite par le même matériel de déchetage possédant deux grilles de calibrage.

◆ L'humidité

On a déjà une idée des différentes plages de mesures où le seau Pandis est plus ou moins fiables.

La plage de plus grande précision serait entre 25 % et 30 %. Les mesures au seau Pandis sont toujours supérieures aux mesures de référence et l'écart croît en fonction de l'humidité.

Les mesures seront effectuées sur les plages suivantes :

< 25 %, Entre 25 % et 30 %, Entre 30 % et 40 %, Entre 40 % et 50 %

◆ L'essence

Les tests seront effectués sur différentes essences feuillues et résineuses les plus couramment utilisées en plaquettes forestières :

➤ - Pour les résineux : Sapin pectiné, Epicéa commun, Pin sylvestre, Douglas

➤ - Pour les feuillus : Châtaignier, Robinier, Noyer (taille d'arboriculture), chêne

◆ La partie de l'arbre utilisée

La plaquette peut être obtenue avec :

- des perches entières (PENT)
- des perches sommairement ébranchées (PEB)
- des branches issues de l'élagage (BR)

Collecte des échantillons

Nombre d'échantillon nécessaire : pour pouvoir avoir tous les cas de figure par rapport aux critères définis, il faut réaliser au minimum 14 tests pour valider l'influence de chacun des critères sur l'appareil.

Suivant la mise en évidence ou non de ces critères, une seconde batterie de tests sera menée pour les valider.

Réalisation des mesures : Nous avons fait appel à une entreprise possédant un matériel de déchetage avec deux grilles de calibrages différentes (ce qui nous permettra d'avoir les deux granulométries) et qui utilise sur son secteur géographique des essences différentes.

Chaque échantillon (60 à 80 litres) sera mesuré par le seau Pandis FMG 3000. Puis il sera divisé en plusieurs échantillons (600 grammes) qui seront mesurés par la méthode de l'étuve (méthode de référence).

Un technicien de FIBOIS est passé sur les sites de stockages de l'entreprise et en forêt, pour sélectionner les diverses plages d'humidité des bois, à l'aide d'un humidimètre.

Exploitation des données récoltées

Les résultats des différents tests seront présentés sous forme de tableaux et graphiques et donneront lieu à des recommandations quant à l'influence de tel ou tel critère.

Il sera prévu de contacter la société PANDIS pour obtenir leurs recommandations si, au vu des dernières séries de tests, la précision des valeurs indiquée n'était pas valable.

2. Mesures avec le seuil Pandis FMG 3000

2.1 - Les résultats des tests

Essence	Type	Granulométrie	N° d'échantillon	Humidité étuve	Humidité FMG 3000
Châtaignier F	PENT	PG	1	19 %	17 %
		GG	2	19 %	17 %
	PEB	PG	3	30 %	35 %
		GG	4	30 %	36 %
Erable F	BR	PG	5	25 %	25 %
		GG	6	25 %	29 %
Chêne F	PENT	PG	7	29 %	32 %
		GG	8	29 %	34 %
Frêne F	PENT	PG	9	36 %	50 %
		GG	10	36 %	> 55 %
Robinier F	PENT	PG	11	30 %	32 %
Pin sylvestre R	PENT	PG	12	28 %	29 %
	BR	PG	13	25 %	28 %
Epicéa R	PEB	PG	14	29 %	30 %

PENT : Perche entière

PG : Petite Granulométrie

BR : Branche

GG : Gros Granulométrie

PEB : Perche ébranchée

R : Résineux

F : Feuillus

2.2 - Analyse des données

2.2.1 Influence de l'humidité

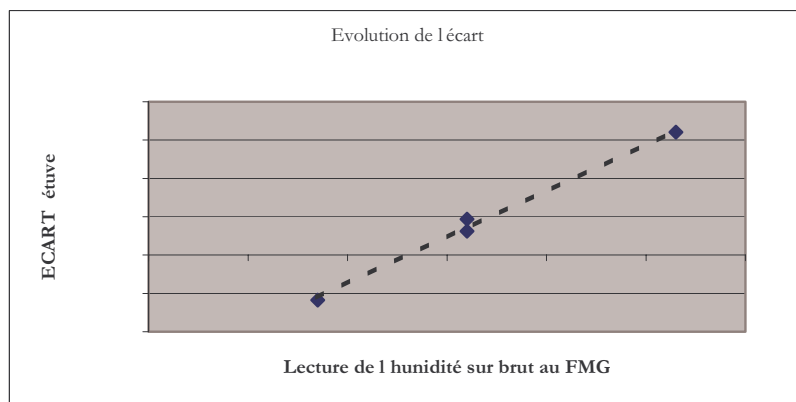
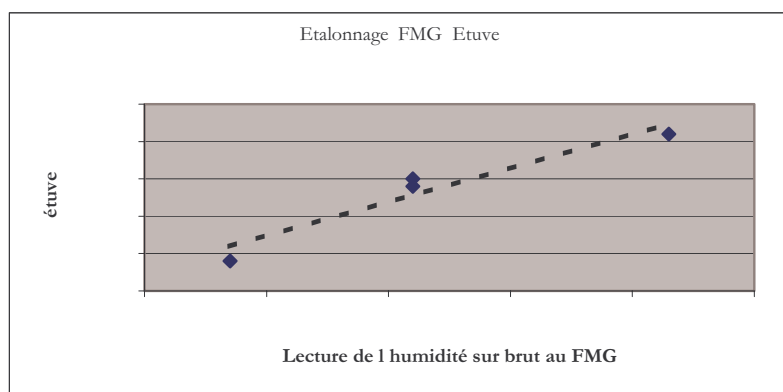
Afin de vérifier l'influence du facteur humidité sur le fonctionnement du FMG 3000, 4 échantillons ont été réalisés. Ces 4 échantillons sont tous issus d'essence feuillue, leurs granulométries sont identiques et ils proviennent de perches entières il n'y a que le facteur humidité qui varie.

Les mesures d'humidité sur brut ont été réalisées à l'aide du seau Pandis FMG 3000 et à l'étuve (méthode de référence) pour voir l'écart entre les mesures.

Cas de feuillus perches entières petite granulométrie (F/PENT/PG)

N°d'échantillon	Echantillons	Etuve	FMG 3000	Ecart/réf.
5	F/PENT/PG	19 %	17 %	-11 %
8	F/PENT/PG	29 %	32 %	10 %
12	F/PENT/PG	30 %	32 %	7 %
9	F/PENT/PG	36 %	53 %	47 %

Représentation graphique

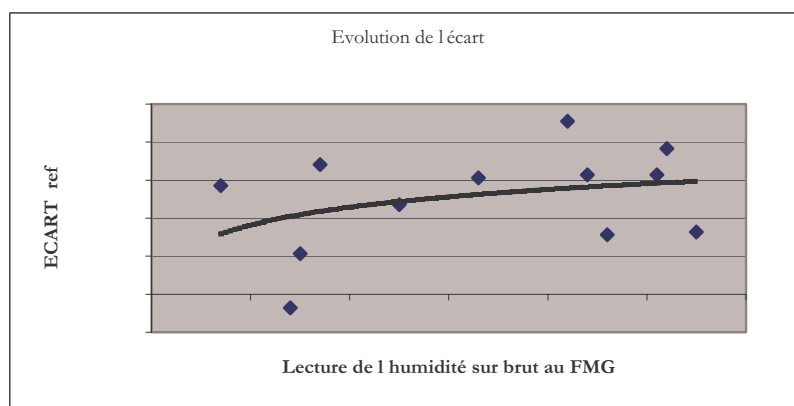


Dans le précédent rapport, le constat effectué sur l'ensemble des échantillons testés était le suivant :

Les mesures du FMG 3000 sont systématiquement supérieures aux mesures de référence (réalisé avec la méthode de l'étuve). Cet écart croît en fonction de l'humidité.

Cependant il semblait que l'on pouvait différencier des plages où l'appareil était plus ou moins fiables. C'est ce qu'a permis d'identifier cette nouvelle batterie de tests.

☞ Résultats des premiers tests :



Type	Origine	Etuve	FMG 3000	Ecart
plaquettes forestières	La Chapelle au bois	14,5 %	14,0 %	- 3,4 %
plaquettes forestières	ONF	5,0 %	7,0 %	40,0 %
plaquettes forestières	ONF	11,2 %	17,0 %	51,8 %
plaquettes forestières	ONF	13,4 %	15,0 %	11,9 %
plaquettes forestières	ONF	19,1 %	25,0 %	30,9 %
plaquettes forestières	ONF	22,9 %	33,0 %	44,1 %
plaquettes forestières	ONF	29,0 %	42,0 %	44,8 %
plaquettes forestières	ONF	30,2 %	44,0 %	45,7 %
plaquettes forestières	ONF	32,1 %	52,0 %	62,0 %
plaquettes forestières	ONF	35,0 %	51,0 %	45,7 %
plaquettes forestières	ONF	38,8 %	46,0 %	18,6 %
plaquettes forestières	ONF	46,0%	> 55 %	19,6 %

Les mesures du FMG 3000 sont pratiquement toujours supérieures aux mesures de référence. L'écart croît en fonction de l'humidité.

En conclusion :

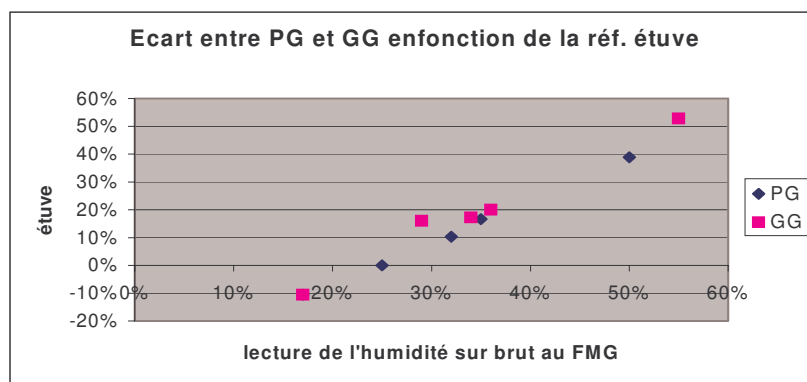
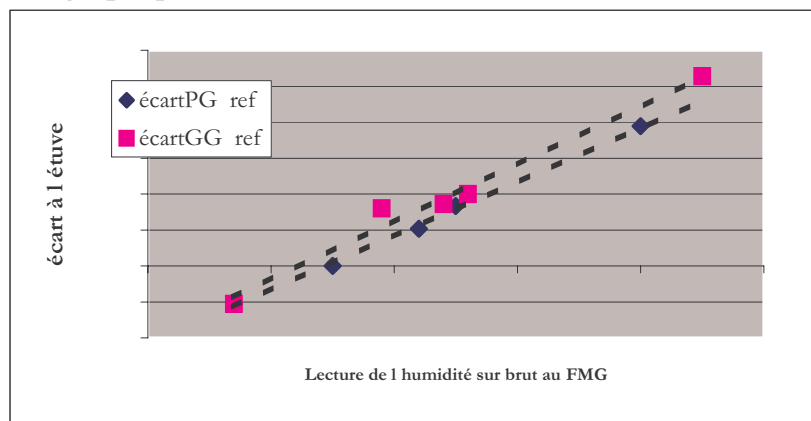
Par rapport aux mesures effectuées et déjà effectuées dans le premier rapport on considère que la plage de confiance de lecture au FMG 3000 se situe entre 20 et 30 avec un écart de +/- 10 % par rapport à la mesure de référence à l'étuve.

2.2.2 Influence de la Granulométrie

Les échantillons produits sont tous issus d'essences feuillus. Pour produire le même échantillon en petite et grosse granulométrie, l'arbre ou la partie de l'arbre utilisé pour le réaliser a été divisé en deux de manière homogène, puis broyé l'un avec la petite grille de calibrage et l'autre avec la grosse grille de calibrage. Pour les échantillons de perches entières, une fois abattu, l'arbre a été ébranché puis coupé en plusieurs billons. Ensuite les billons et branches ont été divisé en deux lots homogènes. Ces deux lots avaient ainsi la même proportion de billon et branche.

N° d'échantillons	Etuve	PG FMG 3000	Ecart/réf	G G FMG 3000	Ecart/réf
1(F/PENT/PG) et 2 (F/PENT/GG)	19 %	17 %	- 11 %	17 %	- 11 %
5 (F/BR/PG) et 6 (F/BR/GG)	25 %	25 %	0 %	29 %	16 %
7 (F/PENT/PG) et 8 (F/PENT/GG)	29 %	32 %	10 %	34 %	17 %
3 (F/PEB/PG) et 4 (F/PEB/GG)	30 %	35 %	17 %	36 %	20 %
9 (F/PENT/PG) et 10 (F/PENT/GG)	36 %	50 %	39 %	>55 %	>53 %

Représentation graphique



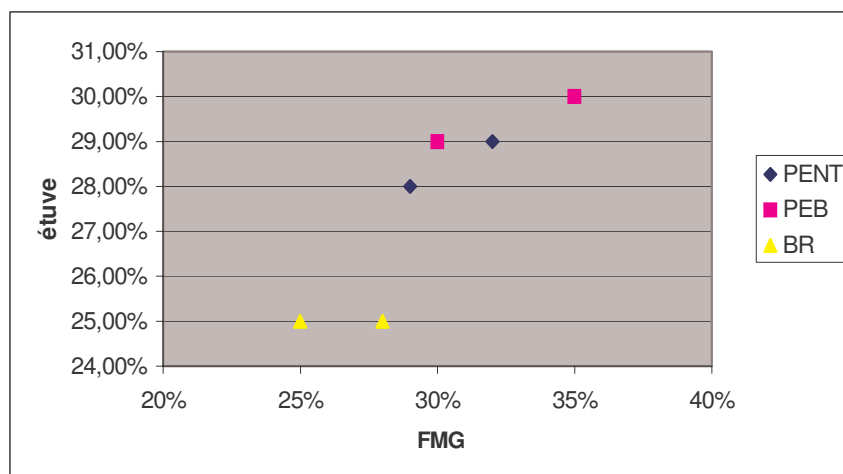
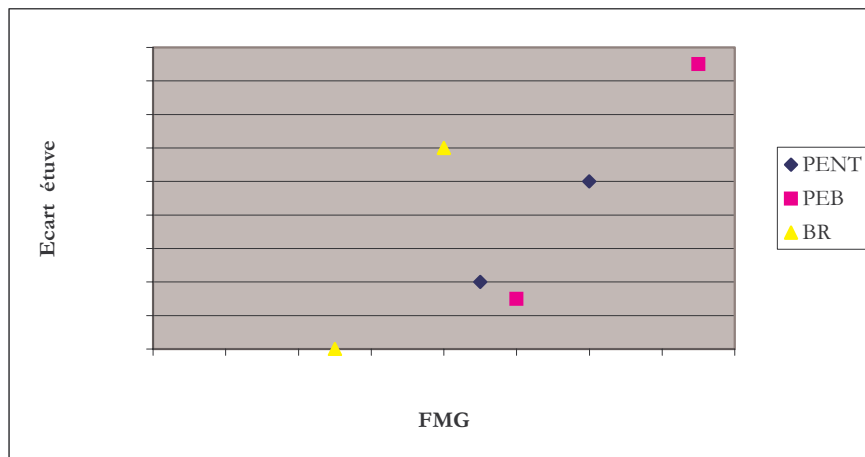
Ces tests sur des échantillons de même nature ayant pour variante la granulométrie ne mettent pas en évidence l'influence de cette dernière annoncée dans le premier rapport.

2.2.3 - Influence du type de bois

Les 6 échantillons comparés ont une humidité sur brut comprise entre 25 et 30 % et ont la même granulométrie. Les paramètres variants sont l'essence et la partie de l'arbre utilisée.

N° d'échantillons	Etuve	FMG 3000	Ecart/réf.
12 (R/PENT/PG)	28 %	29 %	4 %
14 (R/PEB/PG)	29 %	30 %	3 %
13 (R/BR/PG)	25 %	28 %	12 %
7 (F/PENT/PG)	29 %	32 %	10 %
3 (F/PEB/PG)	30 %	35 %	17 %
5 (F/BR/PG)	25 %	25 %	0 %

Interprétation graphique



Les résultats obtenus ne mettent pas en évidence si la composition de la plaquette (partie de l'arbre utilisé) a une influence réelle sur la mesure au FMG 3000.

Les deux premiers échantillons (plaquette forestière issue d'une perche entière de résineux et plaquette issue d'une perche ébranchée) ont pratiquement la même humidité sur brut. L'écart

constaté entre la mesure de référence et la mesure au FMG 3000, sur ces deux échantillons, est quasiment identique.

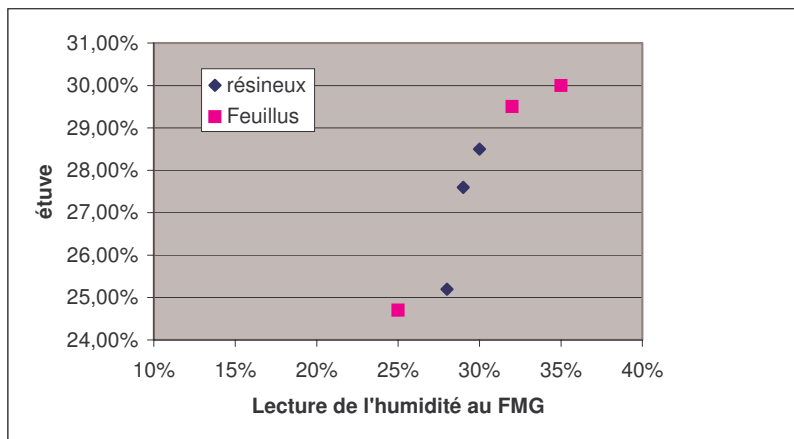
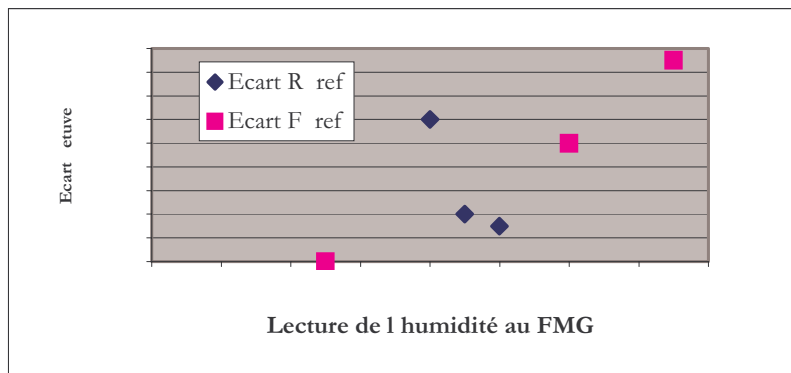
Sur les mesures comparatives effectuées ensuite sur des échantillons de plaquette forestière issus de perche entière et perche ébranchée, l'écart constaté entre la mesure de référence et la mesure au FMG 3000 est deux fois plus important pour l'échantillon perche ébranchée. Ceci ne veut pas pour autant dire que la mesure au FMG 3000 est plus fautive sur une perche ébranchée. L'échantillon perche ébranchée est à 30 % d'humidité sur brut (mesure de référence). Hors on sait que dès que l'on atteint ce seuil de 30 %, l'écart entre la mesure de référence et la mesure au FMG devient importante.

En ce qui concerne les deux échantillons branches les résultats obtenus ne permettent pas de déduire une éventuelle influence sur les mesures au FMG.

2.2.4 - Influence de l'essence

N° d'échantillons		<i>Etuve/réf.</i>	<i>FMG 3000</i>	<i>Ecart/réf.</i>
12	(R/PENT/PG)	28 %	29 %	4 %
7	(F/PENT/PG)	29 %	32 %	10 %
14	(R/PEB/PG)	29 %	30 %	3 %
3	(F/PEB/PG)	30 %	35 %	17 %
13	(R/BR/PG)	25 %	28 %	12 %
5	(F/BR/PG)	25 %	25 %	0 %

représentation graphique



Les résultats obtenus ne mettent pas en évidence l'influence de l'essence.

2.3 - Synthèse et recommandation d'utilisation

D'après les tests réalisés, il apparaît que le facteur principal qui a une forte incidence sur l'erreur de mesure au FMG 3000 est:

=> l'humidité réelle de l'échantillon

Les résultats donnés par le FMG 3000 sont relativement proches de l'humidité réelle de la plaquette quant à sa lecture on se trouve dans une plage comprise entre 20 % et 30 % d'humidité sur brut. Dans cette plage l'écart avec la mesure de référence à l'étuve est de +/-10 %

Les résultats sont fréquemment au-dessus de la réalité. Si le FMG indique une humidité sur brut supérieur à 30 %, le risque d'erreur augmente considérablement. Il est fortement conseillé d'effectuer ou de faire effectuer une mesure de référence si le taux d'humidité de l'échantillon de bois déchiqueté indiqué est au-dessus de cette valeur et s'il ne correspond pas à la tolérance du matériel pour lequel il est destiné.

Par rapport à la granulométrie, au type de bois (partie de l'arbre utilisée) et à l'essence les tests effectués ne mettent pas en évidence l'influence d'un de ces trois facteurs sur la validité de la mesure au FMG 3000.

Cependant pour la granulométrie le conseil suivant peut être donné pour éviter tout problème : il est recommandé de bien tasser le contenu du seau au fur et à mesure de son remplissage et d'éviter de mettre des queues de déchiquetage s'il y en a.

complément

Deux autres facteurs d'écart sur la mesure apparaissent.

Lorsque la plaquette n'est pas contrôlée directement au FMG 3000 et que l'échantillon est conservé dans un sac pour être ensuite vérifié.

Nous avons testé la plaquette au FMG 3000 directement après production puis un jour plus tard en laboratoire avant de pratiquer la mesure de référence.

Sur les échantillons réalisés, il est apparu un écart de 20 % entre les mesures au FMG 3000 effectuées après production et celles pratiquées au laboratoire.

En effet, la plaquette ayant légèrement condensé dans les sacs (pourtant conservés à une température inférieure à 10°C), la mesure au FMG 3000 a ainsi été faussée. Nous avons donc pris pour cette étude les valeurs des mesures effectuées sur le terrain après production.

Nous pouvons rajouter la recommandation suivante qui est dans la notice d'utilisation du FMG 3000 : Attention au bois déchiqueté gelé en période hivernale. Le passage de l'eau à l'état solide conduit à des résultats inexacts.

3. Mesure par le micro-ondes

Le frein à l'emploi des méthodes normalisées est lié d'une part au montant de l'investissement, d'autre part à la durée de l'essai qui le rend coûteux, et ne permet pas de disposer du résultat au moment de la livraison et ainsi de pouvoir opérer un contrôle aisé des approvisionnements.

Une méthode alternative pourrait consister à remplacer le séchage à l'étuve par une méthode de séchage micro-ondes à partir de matériel existant (four micro-ondes grand public) ou en développant du matériel spécifique.

3.1 - Rappel de la méthode micro-ondes

Principe

Détermination, par pesées de la diminution de masse après dessiccation.

Présentation du matériel

Les essais comparatifs ont été réalisés à l'aide d'un four à micro-ondes type électroménager, (la puissance nominale du magnétron est de 1100 W). Il restitue une puissance utile dans la cavité électromagnétique de 700 W.

Cet appareil a un coût d'environ 300 € H.T.

Le bois est déposé dans une coupelle, desséché par période de 2 minutes, jusqu'à l'obtention d'un début d'incandescence. Les éléments sont disposés sur une hauteur de 1 cm environ. La charge est d'environ 0,3 g/cm² au maximum (0,1 g/cm² pour les copeaux).



Pesée de l'échantillon de plaquettes forestières

Mode opératoire

Peser le plateau du four à micro-ondes,

Prélever un échantillon de plaquettes forestières et les déposer de façon uniforme sur le plateau du four à micro-ondes. Peser l'ensemble,

Déshydrater, dans le four à micro-ondes par étapes successives de deux minutes, noter le poids après chaque étape,

Recommencer l'opération jusqu'à l'apparition des taches de pyrolyse ou stabilisation de la masse de l'échantillon, peser l'échantillon et le plateau,

Le pas de mesure de deux minutes peut être augmenté en fonction de l'expérience acquise par l'opérateur, l'objectif étant dans tous les cas d'avoir une mesure juste avant l'apparition des taches de pyrolyse et juste après (sans bien sûr qu'il y ait inflammation du bois),

On répétera cette mesure au moins 3 fois pour obtenir une moyenne donnant une meilleure fiabilité à la mesure,

Les résultats sont comparés à la méthode de référence. Les mesures normalisées sont réalisées dans une étuve ventilée à 103°C. Le séchage dure 24 heures.

Expression des résultats

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

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

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 précédant l'apparition de taches de pyrolyse.

Analyse de la méthode

La méthode est très rapide, il ne faut généralement pas plus de 3 à 4 dessiccations pour arriver au résultat. Le temps de manipulation est donc de 10 à 15 minutes suivant la nature de l'échantillon.

L'évaluation de la précision de la mesure faite au CTBA est de l'ordre de 1 à 2% par rapport à la méthode normalisée NF B 51 004 (TS en préparation, voir en annexe)

Les opérateurs doivent bien être informés des risques d'inflammation de l'échantillon si ce dernier est laissé trop longtemps dans le micro-ondes.

3.2 - Les résultats des tests

41 tests et 14 mesures de références ont été réalisés :

Essence	Type	Granulométrie	Humidité étuve	Humidité Micro-ondes			Moyenne
Châtaignier	perche entière	petite	18%	17%	15%	15%	16%
		grosse	17%	16%	15%	14%	15%
	perche ébranchée	petite	39%	30%	34%	34%	33%
		grosse	38%	30%	32%	27%	30%
Chêne	perche entière	petite	35%	27%	24%	24%	25%
		grosse	29%	25%	23%	24%	24%
Erable	perche ébranchée	petite	37%	32%	32%	29%	31%
		grosse	37%	30%	30%	30%	30%
Frêne	perche entière	grosse	34%	30%	32%	29%	30%
		grosse	35%	30%	29%	28%	29%
Robinier	perche entière	petite	29%	25%	25%	23%	24%
Pin sylvestre	perche ébranchée	petite	52%	44%	44%	44%	44%
Pin sylvestre	branche	petite	23%	21%	22%	21%	21%
Epicéa	perche ébranchée	petite	16%	15%	16%	15%	15%

Tableau n°1: synthèse de l'ensemble des résultats de mesures d'humidités par micro-ondes

3.3 - Analyse des données

3.3.1. Influence de l'humidité

> 25%			25 % < H < 30 %			30 % < H < 40 %			< 40 %		
Etuve	M-O	Ecart	Etuve	M-O	Ecart	Etuve	M-O	Ecart	Etuve	M-O	Ecart
16%	15%	6%	29%	24%	17%	39%	33%	15%	52%	44%	15%
17%	15%	12%				38%	30%	21%			
18%	16%	11%				35%	25%	29%			
23%	21%	9%				37%	30%	19%			
						34%	30%	12%			

Tableau n°2: influence de l'humidité

L'ensemble des résultats obtenus sur la mesure de l'humidité des plaquettes par micro-ondes permet difficilement de dégager une plage d'humidité optimale pour l'utilisation de la technique de détermination de l'humidité par micro-ondes. Il semble toutefois que les meilleurs résultats aient été obtenus pour une humidité des plaquettes inférieure à 25% (voir Figures n°1 et n°2)

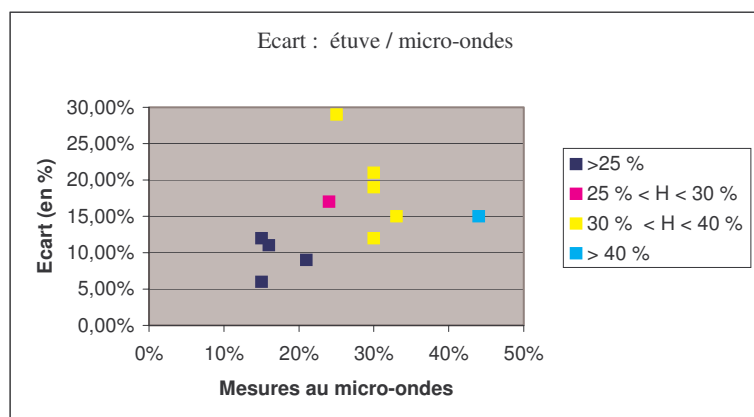


Figure 1

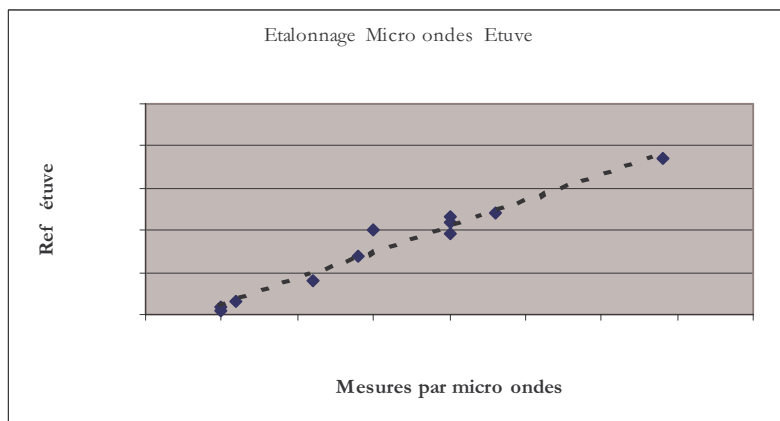


Figure 2

3.3.2 Influence de la granulométrie

	Grosse granulométrie			Petite granulométrie		
	Chêne	Frêne	Châtaignier	Robinier	Châtaignier	Chêne
Micro-ondes	24 %	30 %	15 %	25 %	16 %	35 %
Étuve	29 %	34 %	17 %	29 %	18 %	25 %
Ecart	16 %	11 %	12 %	15 %	12 %	39 %

Tableau n°3 : influence de la granulométrie

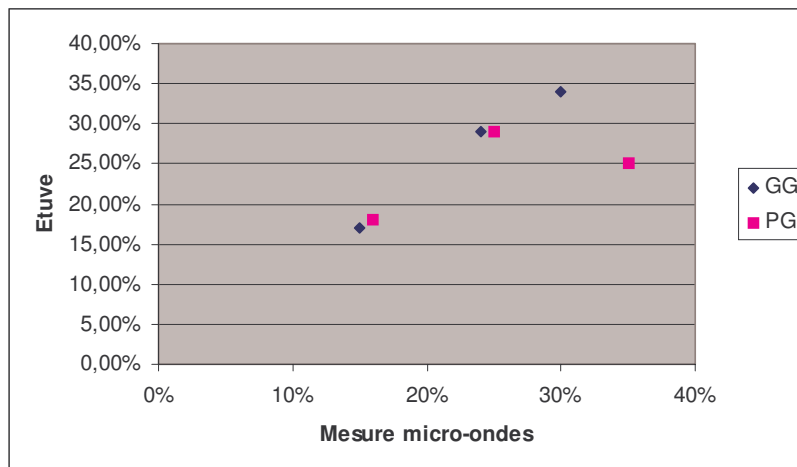
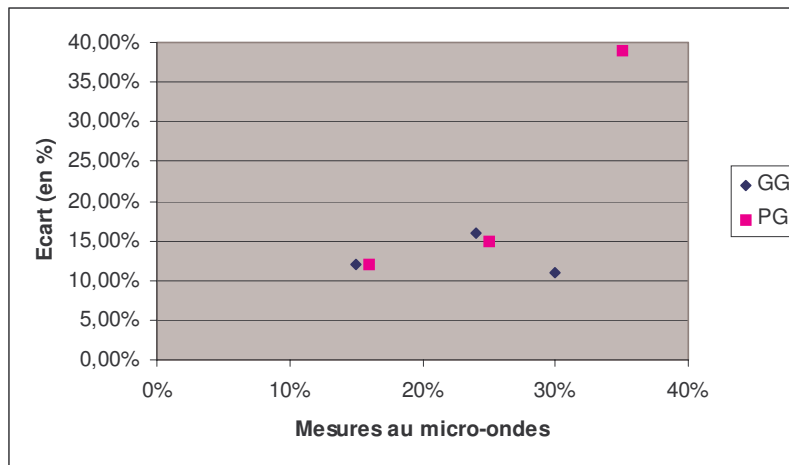


Figure n°3 et n°4 : Influence de la granulométrie des plaquettes de perches entières sur la mesure de l'humidité par micro-ondes.

La méthode de mesure par micro-ondes permet de définir l'humidité des plaquettes avec une précision moyenne d'environ 15% quelle que soit la granulométrie testée. Ceci s'explique par le fait que les micro-ondes permettent de chauffer les plaquettes directement à cœur, quelles que soient leurs dimensions.

3.3.3 Influence du type de bois

	Grosse granulométrie				Petite granulométrie	
	perche ébranchée	perche entière	perche ébranchée	perche entière	perche ébranchée	perche entière
Micro-ondes	30%	15%	29%	15%	33%	16%
Étuve	38%	16%	37%	17%	39%	18%
Ecart	21%	6%	21%	12%	15%	12%

Tableau n°4 : influence du type de bois sur la mesure d'humidité

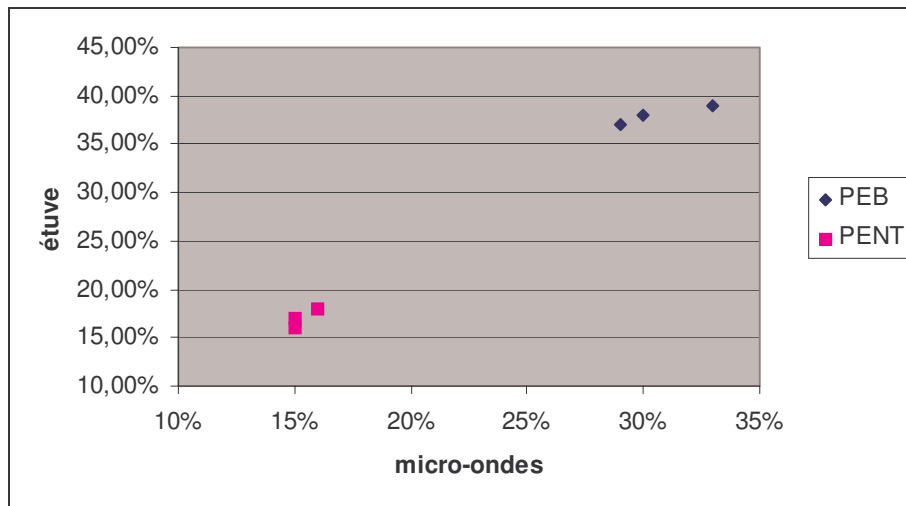
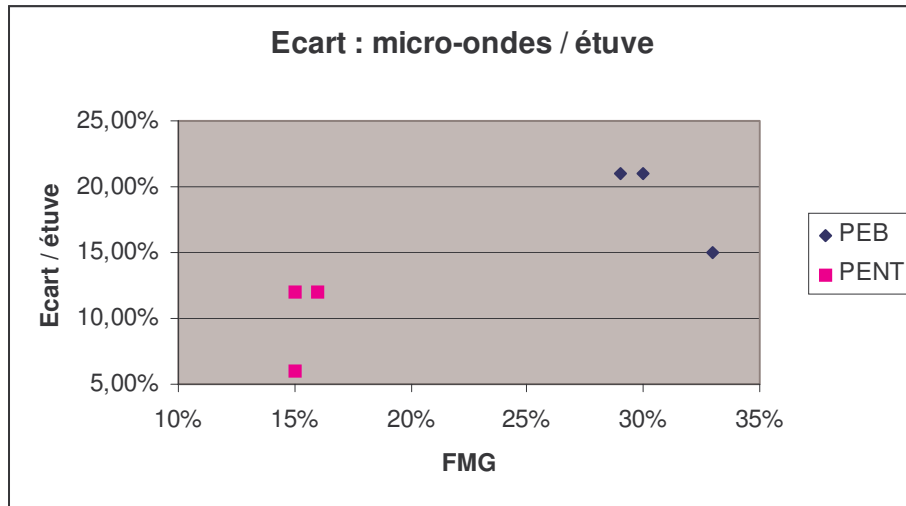


Figure n°4 et n°5 : Influence du type de bois pour des plaquettes de châtaignier sur la mesure de l'humidité par micro-ondes.

Le type de bois utilisé pour la production des plaquettes utilisées durant cette campagne d'essais, n'influence pas la mesure de l'humidité lorsque celle-ci est réalisée par micro-ondes. En règle générale, il est difficile de trier les différents types de bois lors d'une campagne de broyage. Matériellement et économiquement une campagne de broyage sélectif semble compliquée à mettre en place.

3.3.4 Influence de l'essence

	Etuve	micro ondes	Ecart
F PENT GG			
Frêne			
Châtaignier			
Chêne			
F PENT PG			
Robinier			
Châtaignier			
Chêne			
R PEB PG			
Pin Sylvestre			
Epicéa			
F PEB PG			
Châtaignier			
F PEB GG			
Châtaignier			
Erable			
R BR PG			
Pin Sylvestre			
F BR PG			
Erable			

Tableau n°5 : influence de l'essence sur la mesure d'humidité

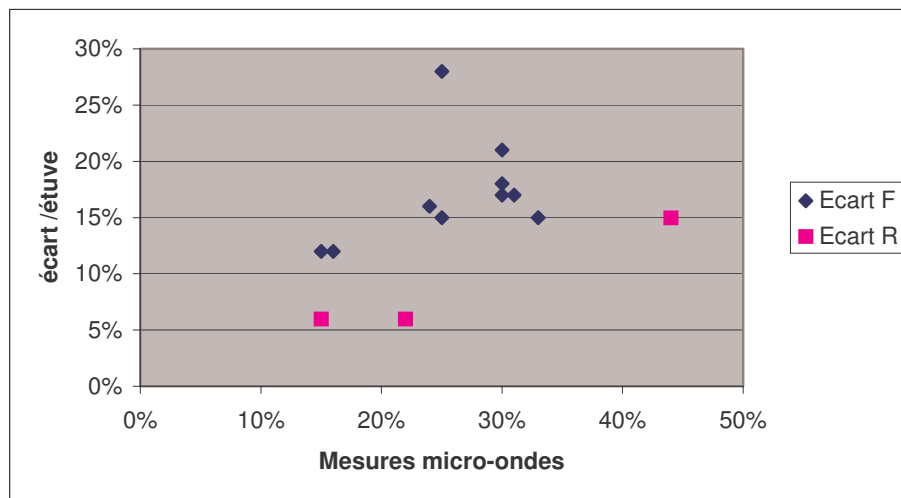


Figure n°6

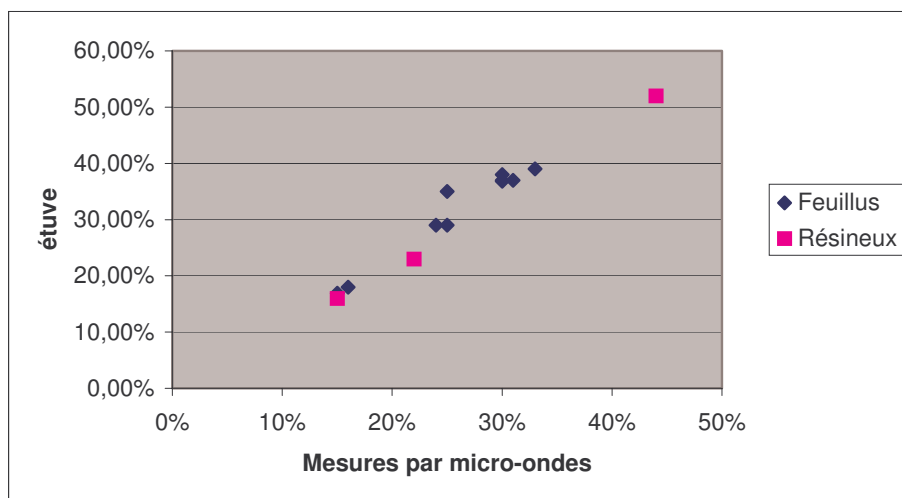


Figure n°7

L'essence du bois, lorsqu'il s'agit de feuillus (voir Tableau n°5) n'influence pas la précision de la mesure de l'humidité, pour des plaquettes de grosse granulométrie issues de perches entières. Aux erreurs de mesures près, l'écart de la mesure de l'humidité entre la technique "micro-ondes" et la technique à "l'étuve" est compris entre 12 et 16%.

Les essais réalisés sur des plaquettes de petite granulométrie issues de perches ébranchées de feuillus ou de résineux (voir Tableau n°5 et Figure n°6 et 7) ne permettent pas la mise en évidence de l'influence de l'essence du bois sur la mesure de l'humidité par "micro-ondes". La figure n°6 montre que pour les résineux l'écart sur la mesure de l'humidité entre la méthode par "micro-ondes" et la méthode à l'étuve est faible (6%) ce qui peut être expliqué par la faible humidité initiale des plaquettes (Tableau n°2).

3.4 - Analyse et conclusion

Les résultats des mesures d'humidité par micro-ondes des plaquettes forestières sont toujours inférieurs en moyenne de 15% par rapport aux valeurs fournies par la méthode de l'étuve. Ces écarts peuvent être expliqués en partie par la non homogénéité des échantillons mesurés. En effet les plaquettes de faibles dimensions vont sécher plus rapidement et finir par se consumer si le champ électromagnétique n'est pas coupé.

Quelles que soient l'essence, la nature ou la granulométrie des plaquettes, une méthode de mesure d'humidité par micro-ondes peut être envisagée avec une précision de l'ordre de 10% par rapport à une méthode à l'étuve. L'amélioration de la précision de la mesure de l'humidité passe par l'optimisation des cycles de chauffe en fonction du type d'essences, de la granulométrie et de la taille des échantillons. Une cavité électromagnétique dimensionnée en fonction d'un cahier des charges préalablement défini devrait permettre d'atteindre une telle précision.

1. Un chauffage au cœur du matériau,
2. Une durée d'essai d'environ 10 minutes contre 24 heures à l'étuve.
3. Un encombrement limité

Faible consommation électrique (pas de montée en température).

III / REALISATION DES FICHES PRATIQUES

Préambule

La première opération, lorsqu'on veut tester les caractéristiques de son combustible est la prise d'échantillon. L'échantillon doit être prélevé méthodiquement selon les lieux de prélèvement (silo, camion, hangar de stockage...) et en quantité suffisante, ceci afin d'être représentatif du lot à contrôler.

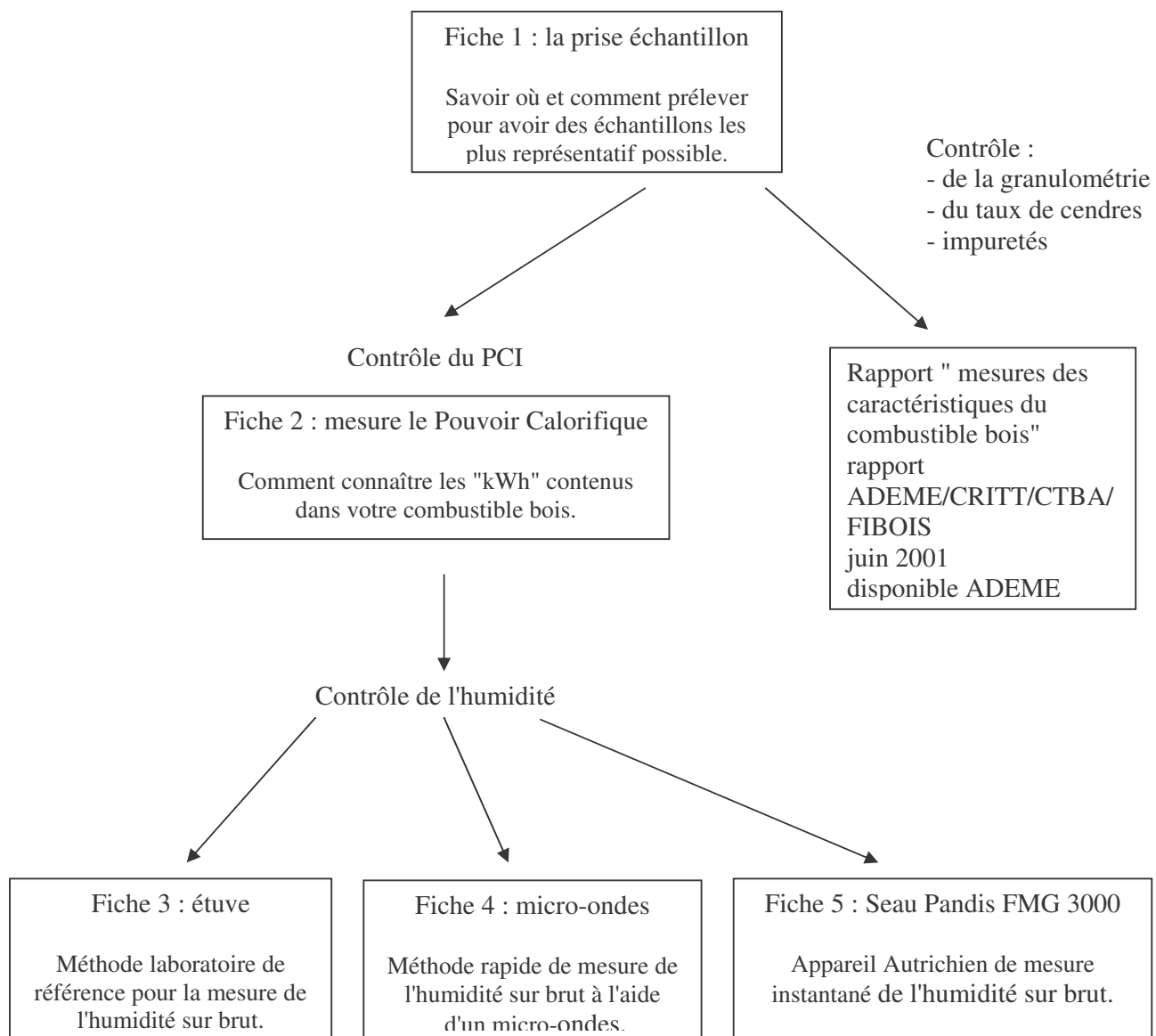
Lors d'un approvisionnement en bois énergie, les caractéristiques importantes à connaître sur le combustible, tant du côté du fournisseur que du client livré, sont la granulométrie et l'humidité.

Ces deux critères doivent respecter le cahier des charges de la chaudière afin d'éviter tous dysfonctionnements.

La granulométrie est facile à apprécier par un simple contrôle visuel. En revanche l'humidité demande à être évaluée précisément.

Pour aller plus loin dans la démarche, il est aussi possible de déterminer à l'aide de l'humidité le PCI du combustible qui permet de connaître la quantité réelle d'énergie contenue dans le combustible (kWh).

Procédure de contrôle des caractéristiques du combustible bois déchiqueté :



Fiche 1. "La prise d'échantillon"

Contrairement aux autres énergies, le bois est un matériau très hétérogène. La mesure de ses caractéristiques est beaucoup plus complexe que pour les autres combustibles.

Ainsi, il est évident que la validité des résultats obtenus dépend de la prise d'échantillon.

Lorsque des tests sont réalisés sur des matériaux hétérogènes et donc plus particulièrement le bois, il est indispensable de se préoccuper de la méthode d'échantillonnage, c'est à dire obtenir un échantillon représentatif des caractéristiques du lot initial.

Afin de s'assurer de la validité des résultats, certains points doivent être précisés avant de réaliser la prise d'échantillon :

- le lieu de la prise d'échantillon,
- la taille d'échantillon (nombre et masse initiale),
- la disposition des points de prélèvement,
- la fréquence de prélèvement.

Lieu de la prise d'échantillon

La prise d'échantillon peut être réalisée à tous les stades d'un approvisionnement et quel que soit le lieu (hangar de stockage du fournisseur, silo, benne de camion, pendant la livraison, ...). Cependant, certains lieux sont à privilégier. En effet, il est préférable de prélever un échantillon lorsque le combustible est mobile et accessible.

Nombre et Taille de l'échantillon

Bon nombre de normes et de méthodes existent ou sont en cours d'élaboration pour déterminer ces deux paramètres (TC 335 en Annexe).

On se fixe la règle suivante de prélèvement : 1 échantillon pour 10 m³ de combustible bois pour un volume par échantillon compris entre 5 et 10 litres.

Analyse des échantillons

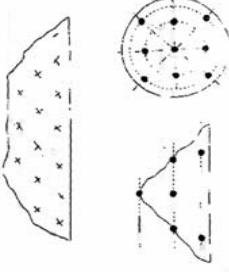
Pour obtenir les résultats moyens des échantillons prélevés, il existe deux grandes méthodes :

- Soit on mélange l'ensemble des prélèvements effectués et on tire un échantillon du mélange devenu homogène. C'est cet échantillon qui sera analysé.
- Soit on mesure les caractéristiques de chaque échantillon prélevé et ensuite on établit une moyenne des mesures réalisées.

Remarque :

Attention, lorsqu'on a plusieurs fournisseurs, on évitera autant que possible de prélever les échantillons après le remplissage du silo (c'est à dire dans le silo ou dans le système d'amenée du combustible). En effet, une fois que le combustible est dans le silo et est transféré à la chaudière, il est impossible de dire de quel fournisseur ou de quelle livraison le combustible provient, cela peut donc générer des conflits.

Au dos de cette fiche un tableau présentant les situations les plus courantes de prélèvement vous guidera.

Ou ?	Avant la livraison		Pendant la livraison		Après la livraison
	Sur le lieu de stockage du fournisseur	Dans la benne du camion avant dépotage du chargement dans le silo	Lors du déchargement par benne à fond mouvant	Lors du convoyage du combustible par bande transporteuse vers le silo de la chaufferie	Lors du déchargement dans une trémie intermédiaire
Quand ?	Si lors de la livraison, - aucune ou peu de possibilités - et que le fournisseur est proche => prélever les échantillons lors du chargement du camion	Vous désirez contrôler votre combustible lorsque le camion arrive sur site avant le bennage dans votre silo. Après contrôle visuel et tactile vous avez des doutes sur le taux d'humidité.*	Votre livraison est effectuée par un camion à fond mouvant dont la vidange s'effectue sans levage de la benne.	Le silo de stockage de votre chaufferie est approvisionné par une bande transporteuse non fermée	Votre chaufferie dispose d'un silo enterré alimenté par une trémie intermédiaire et une vis sans fin.
Comment ? (méthode & nombre d'échantillon)	La fréquence des prélèvements dépend de la capacité du godet et du volume de la benne de transport. Exemple : Camion de 80 m ³ rempli avec un chargeur équipé d'un godet de 2 m ³ . Il faut effectuer 8 prélèvements. - V ³ benne / V ³ godet = nb de chargements pour remplir la benne. 80m ³ / 2 m ³ = 40 chargements - Fréquence de prélèvement = 40 / 8 = 5. => 1 prélèvement tous les 5 chargements.	La moitié des échantillons est à prélever de façon homogène sur la surface accessible, puis l'autre moitié de la même manière en prenant les échantillons le plus profondément possible. Exemple : Pour une benne de 80 m ³ , prélever 4 échantillons en surface puis prélever 4 échantillons sur les mêmes zones de surfaces en profond.	prélever 1 échantillon tous les 10 m ³ . Il suffit dans ces deux cas de connaître le temps moyen de déchargement et de prélever un échantillon toute les x minutes. Exemple : Un camion de 90 m ³ mettant 20 minutes à se décharger : 9 prélèvements sont à effectuer => il faut effectuer un prélèvement toutes les 2 minutes environ.	nombre de prélèvement = volume du tas / 10. Les différents prélèvements sont effectués de manière homogène sur le tas. Exemple : 	Dans le silo de stockage ou le stock tampon Vous êtes approvisionnés par un seul fournisseur et votre silo est facilement accessible ou vous disposez d'un stock tampon.
					Il faut connaître la capacité de la trémie. Exemple : Pour un camion benne de 40 m ³ qui va décharger dans une trémie de 2 m ³ : il faut effectuer 4 prélèvements. - V ³ benne / V ³ trémie = nb de déchargements pour vider la benne. 40 m ³ / 2 m ³ = 20 déchargements - Fréquence de prélèvement = 20 / 4 = 5. => 1 prélèvement tous les 5 remplissages de trémie.

*En cas de doute sur l'humidité du combustible :

- 1) prélever le nombre d'échantillon nécessaire, mélanger les et récupérer un échantillon homogène à analyser.
- 2) deux méthodes pour tester rapidement l'humidité du combustible : la méthode du micro-ondes (fiche 3) ou l'appareil de mesure instantané seau Pandis FMG 3000 (fiche 4). Ces deux méthodes ont leurs limites d'application, reportez-vous à leur fiche pour voir laquelle est la plus adaptée.
- 3) Si des doutes persistent, faire effectuer des tests en laboratoire (Fiche 2).

Fiche 2. "Comment mesurer efficacement le Pouvoir Calorifique de votre livraison de bois"

Le pouvoir calorifique donne une valeur d'énergie contenue dans une unité de masse de combustible. L'unité SI est le J/g.

Définition

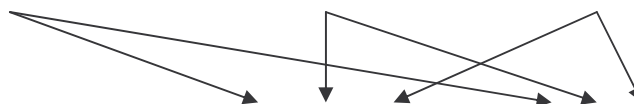
Le **pouvoir calorifique supérieur (PCS)** où l'eau résultant de la combustion est ramenée à l'état liquide dans les produits de combustion (chaudière à condensation).

Le **pouvoir calorifique inférieur (PCI)** prend en compte la chaleur latente de vaporisation de l'eau qui reste à l'état de vapeur dans les produits de combustion.

Pour la **prise d'échantillon**, se reporter à la fiche n°2

Démarche pour déterminer le PCI

1 ^{ère} étape: mesure de l'humidité	FMG 3000	Micro-ondes	Etuve
Contexte	Mesure sur sites	Mesure sur sites	Méthode de laboratoire En cas de litige
Coût approximatif	chère (coût appareil 1900 €)	économique	chère
Précision de la mesure	+/- 20%	+/- 5%	Méthode de référence
Détail de la méthode	Voir fiche n°5	Voir fiche n°4	Voir fiche n°3



2 ^{ème} étape : Mesure du PCI anhydre	Méthode calorimétrique	Calcul : Formule approchée	Détermination par abaque
Précision de la mesure	Méthode de référence	+/- 5%	+/- 10% suivant le graphique
Coût approximatif	200 €	70 €	économique
Détail de la méthode	Nécessite : Un essai à la bombe calorimétrique, plus la détermination de la teneur massique en hydrogène.	Nécessite : La détermination de la teneur massique en carbone et en hydrogène du bois.	Simplicité et rapidité. (combiné avec la mesure d'humidité par MO sur sites)

3 ^{ème} étape : Mesure du PCI brut	$PCI_{\text{brut}} = PCI_{\text{anhydre}} \times \frac{(100 - E)}{100} - 6 \times E$
--	--

E : humidité en %

Explications détaillées

- La **formule approchée** de détermination du pouvoir calorifique inférieur anhydre présenté ici est un bon compromis entre la précision du résultat obtenu ($\pm 5\%$), la facilité de mise en œuvre et le coût de la méthode (70 € H.T.)

$$PCI_{\text{anhydre}} = 4,18 \times (94,19 \times C - 0,5501 - 52,14 \times H)$$

avec : PCI : pouvoir calorifique inférieur en kJ/kg, C : pourcentage massique de carbone, H : pourcentage massique d'hydrogène.

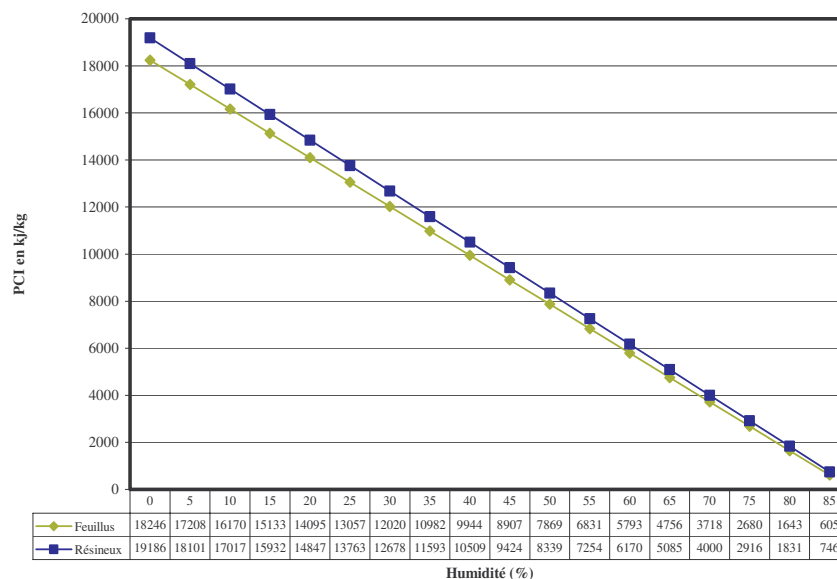
La détermination de la composition élémentaire de l'échantillon de bois déchiqueté est réalisée par un laboratoire spécialisé. A titre indicatif, le tableau 1 présente les intervalles de variation des principaux éléments de la composition du bois.

Elément	Taux en %
C	46 < [] < 49
H	5 < [] < 7
O	43 < [] < 46
N	0 < [] < 0,5

Tableau n°1

- Une mesure du taux d'humidité (norme CEN/TC 335/WG 4 N 48) et une décomposition élémentaire (norme CEN/TC 335/WG 4 N 27) sont indispensables pour déterminer le pouvoir calorifique du bois. Les modes opératoires de ces projets de normes européennes sont très proches de ceux des normes françaises (M 03-037). Elles apportent des spécifications, propres au bois déchiqueté.

Sur la base du PCI moyen des feuillus et des résineux la variation du PCI en fonction de l'humidité est la suivante:



Pouvoir calorifique inférieur en fonction de l'humidité

Remarque et préconisation

Dans le cadre de l'utilisation de PCI brut du bois pour déterminer la qualité du combustible livré, il semble raisonnable d'utiliser une valeur moyenne du PCI anhydre en fonction de l'essence ou du type d'essence et d'appliquer une correction liée à l'humidité du combustible. L'humidité du combustible est une caractéristique qu'il est possible de mesurer de façon simple, rapidement, à un faible coût.

L'influence de l'humidité est donc très importante sur le PCI brut

Fiche 3. "Méthode de référence de mesure de l'humidité"

Principe

Détermination, par pesées de la diminution de masse après dessiccation.

Mode opératoire & expression du résultat

La mesure est effectuée en laboratoire suivant une procédure normalisée (NF M 03-002) :

- **1. Pesée** de l'échantillon représentatif humide grâce à une balance de précision 0,5 g. La masse relevée est **Mh(g)**



Pesée d'échantillon (échantillon d'environ 500 g)

- **2. Déshydratation** de l'échantillon dans une étuve ventilée réglée à $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante.

La masse de l'échantillon est considérée comme constante lorsque la variation de masse entre deux pesées successives effectuées à une heure d'intervalle est inférieure à 1 gramme.



Etuve ventilée ouverte

- **3. Pesée** de l'échantillon après déshydratation. La masse relevée est **Ms**
- **4. Calcul du taux d'humidité sur** brut de l'échantillon par la formule :

$$H(\%) = \frac{Mh(g) - Ms(g)}{Mh(g)} \times 100$$

Remarque

Cette méthode de mesure est la plus précise elle donne un résultat très fiable (méthode dite de référence). Par contre c'est la plus longue et la plus coûteuse. Il faut en moyenne 7 h pour arriver à la dessiccation complète de l'échantillon. D'autres méthodes très rapides mais moins

précises existe. Elles permettent d'avoir rapidement, lors de la livraison du combustible par exemple, une appréciation de l'humidité du combustible

voir fiches 4.2.3 méthodes micro-ondes et 4.2.4. mesure au seau Pandis FMG 3000).

Fiche 4. "Mesure de l'humidité à l'aide d'un micro-ondes"

Pour mesurer l'humidité du bois (plaquette déchiquetée, sciures, copeaux, écorces), une méthode alternative consiste à remplacer le séchage à l'étuve par une méthode de séchage micro-ondes à partir de matériel existant (four micro-ondes grand public)

Principe

Détermination par pesées de la diminution de masse après dessiccation.

Présentation du matériel

Les mesures sont réalisées à l'aide d'un four à micro-ondes, type électroménager, (puissance nominale de 1 100 W).



Pesée de l'échantillon de plaquettes forestières

Le bois est déposé dans une coupelle, desséché par période de 2 minutes, jusqu'à l'obtention d'un début d'incandescence. Les éléments sont disposés sur une hauteur de 1 cm environ. La charge est d'environ 0,3 g/cm² au maximum (0,1 g/cm² pour les copeaux).

Mode opératoire

- Peser le plateau du four à micro-ondes,
- Prélever un échantillon de combustible bois déchiqueté et le déposer de façon uniforme sur le plateau du four à micro-ondes.
- Peser l'ensemble, Déshydrater, dans le four à micro-ondes par étapes de deux minutes, noter le poids à chaque étape.
- Recommencer l'opération jusqu'à l'apparition des taches de pyrolyse, peser l'échantillon et le plateau .
- Le pas de mesure de deux minutes peut être augmenté en fonction de l'expérience acquise par l'opérateur.
- L'objectif étant dans tous les cas d'avoir une mesure juste avant l'apparition des taches de pyrolyse et juste après (sans bien sûr qu'il y ait inflammation).

On répétera cette mesure au moins 3 fois pour obtenir une moyenne donnant une meilleure fiabilité à la mesure,

Expression des résultats

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

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

m1 : masse du plateau,

m2. : masse du plateau et de l'échantillon humide,

mp : masse du plateau et de l'échantillon après apparition des taches de pyrolyse,

mp-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 taches de pyrolyse.

Conseils et recommandations

- **Temps de manipulation pour une mesure :** La méthode est très rapide, il ne faut généralement pas plus de 3 à 4 dessiccations pour arriver au résultat. Le temps de manipulation est donc de 10 à 15 minutes suivant la nature de l'échantillon.
- **Plage d'utilisation et fiabilité :** La mesure varie en moyenne de plus ou moins 5 % par rapport à la méthode normalisée utilisant une étuve, si lors d'une livraison des doutes persistes il est conseillé d'utiliser cette dernière .
- **Les opérateurs doivent bien être informés des risques d'inflammation de l'échantillon si ce dernier est laissé trop longtemps dans le micro-ondes.**

Fiche 5. "Mesure de l'humidité au Sceau Pandis : FMG 3000"

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

Présentation et principe

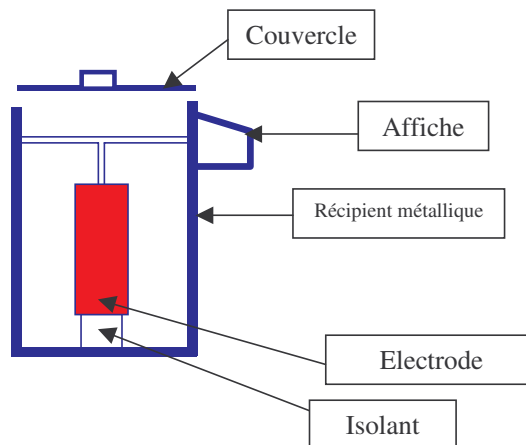
Le principe de la mesure est la détermination de la capacité d'un bac rempli de particules de bois. La plaque extérieure est constituée par le revêtement en tôle du bac. Une plaque intérieure isolée est insérée à l'intérieur du bac.

Le récipient métallique correspond à un condensateur.

L'électrode externe est le revêtement métallique du récipient, l'électrode interne est située au milieu du récipient et est isolée de l'extérieur.

Le principe de mesure repose sur les changements de fréquence d'un oscillateur causés par le bois humide.

L'appareil indique l'humidité sur brut d'un échantillon de 60 à 80 litres. La mesure est quasi instantanée. L'étalonnage est lui aussi très rapide.



Utilisation de l'appareil

1 - Calibrage :

Avant la première mesure il est nécessaire de calibrer l'appareil. Pour cela :

- Le bac de mesure doit être vide, sec et le couvercle doit être bien fermé.
- Appuyer brièvement sur la touche M.
L'affichage indique : **FMG 3000 MESSBERIT**
- Appuyer de nouveau sur la touche M pendant plus de 4 secondes jusqu'à ce que l'affichage indique : **AUSLEEREN UND TASTE DRUECKEN**
- Appuyer une dernière fois brièvement sur la touche M pour lancer le calibrage. L'affichage indique : **HYGROMTER WIRD KALIBRIERT**
- Fin de calibrage, l'affichage indique : **WASSERGEHALT 0 %**

L'appareil est étalonné. Il est prêt pour la mesure.



2 - Remplissage :

- Utiliser un seau ou une pelle pour remplir le bac.
- Lorsque le bac est rempli à moitié, il faut tasser le bois déchiqueté en secouant le FMG 3000, afin de diminuer l'espace vide.
- Une fois le remplissage terminé, jusqu'au tube transversal bleu en haut, tasser de nouveau.

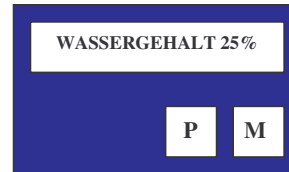


FMG 3000 avant remplissage FMG 3000 correctement rempli

3 - Mesure :

- Fermer correctement le couvercle.
- Appuyer brièvement sur M pour lancer la mesure.
- L'affichage indique quasiment instantanément un taux d'humidité sur brut (WASSERGEHALT en %).
- Pour effectuer éventuellement dans la foulée d'autres mesures, il n'est pas nécessaire d'étalonner à nouveau le FMG 3000. Vider le bac, le nettoyer à l'aide d'un chiffon sec, le recharger et lancer la mesure suivante. Le temps de manipulations pour une mesure est d'environ cinq minutes

Exemple de lecture



Le taux d'humidité est toujours indiqué sur brut

Remarques sur l'appareil

La touche P de la commande électronique est destinée à des fonctions spéciales sur d'autres matériels fabriqués par la société autrichienne Pandis et n'est pas utilisée sur cet appareil.

➤ **Fiabilité de la mesure :**

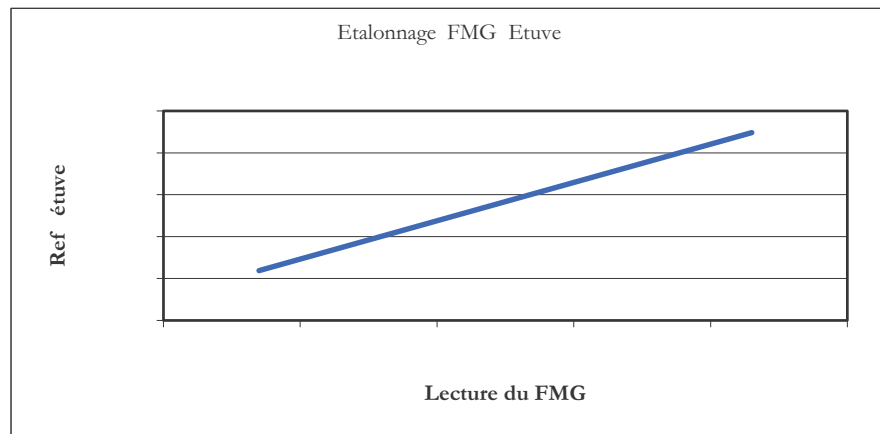
Les résultats sont fréquemment au-dessus de la réalité.

Si le FMG indique une humidité sur brut supérieure à 30 %, le risque d'erreur augmente considérablement. Il est fortement conseillé d'effectuer ou de faire effectuer une mesure de référence.

Attention aussi au bois gelé en période hivernale. Le passage de l'eau à l'état solide conduit à des résultats inexacts.

➤ **Plage d'utilisation :**

La plage de confiance du FMG 3000 se situe entre 20 et 30 %. Cet appareil est surtout intéressant pour les chaufferies aux bois déchiquetés acceptant un combustible à moins de 30 % d'humidité sur brut.



Bibliographie PCI

- Mc ADAMS, "**Heat transmission**", 3^{ème} édition - Mc Graw Hill Compagny, New-York 1954, Transmission de la chaleur, Ed, Dunod, Paris 1961
- Aide Mémoire du Thermicien - A3,E2,Th, Association amicale des anciens élèves de l'école de thermique, Publié par IFE Editions Européennes Thermique et Industrie
- A review and critical assessment of ten reports relevant to standards for solid biofuels, Green Land - 1999
- Best practise list for biomass fuel and ash analysis in the Netherlands, NOVEM - 1998
- Bois Holz Energie, le marché du poêle à granulé aux USA, Revue technique européenne (septembre 1999)
- Calorimetry, the cone calorimeter, Fire protection engineering - 1995
- Combustibles bois-énergie
- CTBA Taux d'écorces des bois ronds feuillus; chêne et hêtre
- CTBA Taux d'écorce des bois ronds résineux
- CTBA Guide pratique de la mesure d'humidité du bois
- CEN/TC 335/WG4 N9 Solid biofuels Method for determination of moisture content, AFNOR - 1990,
- F, DEUVERT, "**Combustibles gazeux - Gaz naturel**", Techniques de l'ingénieur, 11-1984, B, 1755,
- GDF "**Combustibles gazeux et principes de la combustion**", Direction des services économiques et communication, BT 104, Edition de Janvier 1984,
- J, JAEGLE et coll, "**Calcul, conception et utilisation des brûleurs industriels à gaz**", Collection des techniques gazières,
- R, KISSEL, "**Combustion et fours industriels en technologies gazières**", Ecole polytechnique de Montréal, Edition de 1989,
- R, KISSEL, "**Influence des courants de recirculation sur la longueur des flammes de diffusion turbulentes**", Revue générale de thermique n°132-1972,

- La combustion du bois, Cours ENSTIB
- J, LEFEBVRE, and all, "**Combustibles, combustion et flammes**"
- Méthodes internes, Critt bois
- Mesure de l'humidité des solides dans l'industrie, Guide ADEME
- G, MONNEL, "**La combustion dans les fours et les chaudières**", Ed, Technip, Paris 1978,
- Norme NF M03-002 : Combustibles minéraux solides : Détermination de l'humidité, AFNOR - 1994
- Norme M 03-037 : Combustibles minéraux solides : détermination de l'humidité d'une prise d'essai pour l'analyse général d'un combustible solide naturel,
- Norme M 03-040 : Houille : Analyse granulométrie par tamisage
- Norme NF B 51-004 Bois Détermination de l'humidité
- Norme NF M03-003 : Détermination du taux de cendres, AFNOR - 1994
- Norme ISO 1171 : Combustibles minéraux solides : détermination du taux de cendres, ISO - 1197
- Norme NF M03-005 : Détermination du pouvoir calorifique supérieur et calcul du pouvoir calorifique inférieur, AFNOR - 1990
- Norme SS 18 71 74 Biofuels and peats : Determination of size distribution :
- Norme DIN 51 900 : Determination of the gross calorific value by bomb calorimeter and calculation of the net calorific value, DIN - 1977
- E, PERTHUIS, "**Aspects thermiques - Pollution due à la combustion**", IFE, ref, 29 552, octobre 1981,
- Priorities for methods of sampling and testing in the context of preparing European standards for solid biofuels, Green Land - 2000
- Quality assurance manual for solid wood fuels in Finland, VTT Energy - 1998
- G, de SOETE et A, FEUGIER, "**Aspects physiques et chimiques de la combustion**", Edit, Technip, 1976,
- Standardisation for biofuels in Germany
- Center of Agricultural Engineering - 1999
- Swedish standards on biofuels

- Transformations thermochimiques du bois ; Pyrolyse et combustion, Cours ENSTIB,
- Unité et mesure des combustibles bois, FIBOIS
- P, VIEL, J, LHERAULT, "Production de chaleur à partir des gaz combustibles",
Techniques de l'ingénieur, 2-1987, B 2115,
- C, VOUELLE et coll, "Formation de suie dans les flammes", Revue générale de
thermique n°310-1987,
- Wood fuels standards, ETSU - 1993

ANNEXES 2

Liste des spécifications techniques (TS) :

Afin de permettre au TC 335 “Biocombustibles solides” de raccourcir les délais d’élaboration des normes, il a été décidé d’élaborer, dans un premier temps des Spécifications Techniques (anciennement ‘prénormes’ : ENV).. L’objectif de cette procédure permet de réduire à deux ans, la mise à disposition de textes européens.

Ultérieurement, ces textes pourront à la demande des organismes de normalisation, du CEN ou de la Commission Européenne, être transposés en Normes Européennes (EN).

Les projets de textes sont uniquement disponibles pour les professionnels (centres techniques, industriels) qui ont une activité dans la filière bois énergie

Contact : Catherine DILLEE- AFNOR-DME

11, avenue Francis de Pressense

F-93571 Saint-Denis la Plaine Cedex

Tel. : +33 (0)1 41 62 84 96

Fax : +33 (0)1 49 17 90 00

e-mail : catherine.dillee@afnor.fr

Norme française	Stade Date cible	Titre français	Titre anglais
Groupe de travail n° 1 Terminologie, animation Allemande			
X 34-100	Etape en cours 51 En enquête Pub : juin 2003	Biocombustibles solides - Terminologie, définitions et description	Solid biofuels - Terminology, definitions and description
Groupe de travail n° 2 Classification et assurance qualité, animation Finlandaise			
<u>X 34-110</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 06.2002 Pub : juin 2003	Biocombustibles solides - Classes et spécifications des combustibles	Solid biofuels - Fuel specifications and classes
<u>X 34-111</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 12.2002 Pub : déc 2003	Biocombustibles solides - Assurance qualité	Solid biofuels - Quality assurance
Groupe de travail n° 3 Echantillonnage, animation Anglaise			
<u>X 34-120</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 10.2002 Pub : oct 2003	Biocombustibles solides - Echantillonnage - Partie 1 : Méthodes d'échantillonnage	Solid biofuels - Sampling - Part 1 : Methods for sampling
<u>X 34-121</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 10.2002 Pub : oct 2003	Biocombustibles solides - Echantillonnage - Partie 2 : Méthode pour l'échantillonnage d'une livraison de matériau par camion	Solid biofuels - Sampling - Part 2 : Methods for sampling material delivered in lorries
<u>X 34-122</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 10.2002 Pub : oct 2003	Biocombustibles solides - Echantillonnage - Partie 3 : Méthodes pour la préparation de plans d'échantillonnage et de certificat d'échantillonnage	Solid biofuels - Sampling - Part 3 : Methods for preparing sampling plans and sampling certificate
<u>X 34-123</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 10.2002	Biocombustibles solides - Echantillonnage - Partie 4 : Méthodes de réduction	Solid biofuels - Sampling - Part 4 : Methods for sample

	Pub : oct 2003	d'échantillon	reduction
Groupe de travail n° 4 Essais physiques et mécaniques, animation Suédoise			
<u>X 34-130</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 11.2002 Pub : nov 2003	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination du pouvoir calorifique	Solid biofuels - Methods for the determination of caloric values
<u>X 34-131</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 05.2003 Pub : mai 2004	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la densité apparente	Solid biofuels - Methods for determination of bulk density
<u>X 34-132</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 06.2002 Pub juillet 2004	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de l'humidité Partie 1 : Méthode de routine Partie 2 : Méthode d'analyse Partie 3 : Méthode de référence	Solid biofuels - Method for determination of moisture content - Oven dry method Part 1: Method for trade purpose Part 2: Analytical method Part 3: Reference method
<u>X 34-133</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 10.2003 Pub fev 2004	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la teneur en composé volatil	Solid biofuels - Method for determination of the content of volatile matter
<u>X 34-134</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 01.2002 Pub janv 2003	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la teneur en cendres	Solid biofuels - Method for the determination of ash content
X 34-135	Etape en cours 11 Etape 32 : 12.2003 Pub déc 2004	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination du comportement des cendres en mélange	Solid biofuels - Method for the determination of ash melting behaviour
<u>X 34-136-1</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 12.2002 Pub juin 2004	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la dimension et de la distribution des particules - Partie 1 : Méthode par écran oscillatoire	Solid biofuels - Method for the determination of particles dimension and particles size distribution - Part 1 : Method by oscillating screen
<u>X 34-136-2</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 12.2002 Pub juin 2004	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la dimension et de la distribution des particules - Partie 2 : Méthodes par écran rotatif	Solid biofuels - Method for the determination of particles dimension and particles size distribution - Part 2 : Method by rotating screen
X 34-137	Etape en cours 11 Etape 32 : 12.2004 Pub déc 2004	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination des impuretés	Solid biofuels - Method for the determination of impurities
<u>X 34-138-1</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 12.2002 Pub mai 2003	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la résistance - Partie 1 : Granulés	Solid biofuels - Method for the determination of durability - Part 1 : Pellets
<u>X 34-138-2</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 12.2002 Pub mai 2003	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la résistance - Partie 2 : Briquettes	Solid biofuels - Method for the determination of durability - Part 2 : Briquets
X 34-139	Etape en cours 11 Etape 32 : 05.2003 Pub mai 2004	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la densité des granulés et des briquettes	Solid biofuels - Method for the determination of density of pellets and briquets
X 34-140	Etape en cours 11 Etape 32 : 05.2003 Pub mai 2003	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de "l'écoulement"	Solid biofuels - Method for the determination of binding properties
<u>X 34-141</u>			Determination of basic density of compressed material - Part 1: Measurement of irregularly shaped pieces
Groupe de travail n° 5 Essais chimiques, animation Hollandaise			
<u>X 34-150</u>	Etape en cours 11 Etape 32 : 2002	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la teneur en carbone (C)	Solid biofuels - Method for the determination of carbon

	Pub sept 2003		(C) content
<u>X 34-150</u>	Étape en cours 11 Étape 32 : 2002 Pub sept 2003	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la teneur en hydrogène (H)	Solid biofuels - Method for the determination of hydrogen (H) content
<u>X 34-150</u>	Étape en cours 11 Étape 32 : 2002 Pub sept 2003	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la teneur en azote (N)	Solid biofuels - Method for the determination of nitrogen (N) content
<i>Les méthodes de détermination du Carbone, de l'Hydrogène et de l'Azote feront l'objet d'une norme unique</i>			
X 34-153	Rédaction suspendue, remplacée par une définition	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la teneur en oxygène (O)	Solid biofuels - Method for the determination of oxygen (O) content
<u>X 34-154</u>	Rédaction en cours Étape 32 : 09.2002 Pub sept 2003	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la teneur en chlore et en soufre	Solid biofuels - Method for the determination of chlorine and fluorine content
<u>X 34-155</u>	Rédaction en cours Étape 32 : 09.2002 Pub sept 2003	Biocombustibles solides - Méthode de routine pour la détermination de la part soluble de chlore	Solid biofuels - Method for the determination of soluble part of chlorine
<u>X 34-156</u>	Rédaction en cours Étape 32 : 09.2002 Pub sept 2003	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la teneur en éléments majeurs (Al, Si, K, Na, Ca, Mg, Fe, P et Ti)	Solid biofuels - Method for the determination of major elements (Al, Si, K, Na, Ca, Mg, Fe, P and Ti)
<u>X 34-157</u>	Rédaction en cours Étape 32 : 09.2002 Pub sept 2003	Biocombustibles solides - Méthode pour la détermination de la teneur en éléments mineurs (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Se, Te, V et Zn)	Solid biofuels - Method for the determination of minor elements (As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Mn, Ni, Pb, Se, Te, V and Zn)