

ADEME



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

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

« *Evaluation et proposition de méthodes
d'analyse de combustible* »

ADEME

Critt Bois – Fibois – CTBA

JUIN 2001



Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Ont participé aux travaux et au présent document :

Pour l'ADEME : Jean Christophe POUET et Christophe BAREL

Pour le CRITT Bois D'Epinal : Bernard DIETSCH

Pour le CTBA : Jean Louis BONNET

Pour FIBOIS Ardèche-Drôme : Pierre BENEVENT et Philippe PASIN

SOMMAIRE

INTRODUCTION	6
---------------------	----------

PREMIERE PHASE

LA PRISE D'ECHANTILLON	14
-------------------------------	-----------

AVANT-PROPOS	15
RECENSEMENT DES NORMES ET METHODES EUROPEENNES.....	15
ALLEMAGNE	15
AUTRICHE.....	16
SUEDE	17
DANEMARK	18
SYNTHESE	19

LE POUVOIR CALORIFIQUE INFERIEUR	21
---	-----------

AVANT PROPOS.....	22
RECENSEMENT DES NORMES FRANÇAISES ET EUROPEENNES.....	23
FRANCE.....	23
INTERNATIONALE	27
ALLEMAGNE	27
FINLANDE	28
PAYS BAS	28
SUEDE	29
GRANDE-BRETAGNE.....	29
TCHECOSLOVAQUIE.....	29
ANALYSE DES NORMES.....	30
METHODES GENERALEMENT UTILISEES	32
VARIATION DU PCI EN FONCTION DE L'ESSENCE.....	32
VARIATION DU PCI EN FONCTION DE L'HUMIDITE.....	34
SYNTHESE GLOBALE	37
EVALUATION DES METHODES.....	37
LISTE DES FABRICANTS	38
CONCLUSION	39

LA TENEUR EN HUMIDITE	40
------------------------------	-----------

AVANT PROPOS.....	41
RECENSEMENT DES NORMES FRANÇAISES ET EUROPEENNES.....	42
FRANCE.....	43
INTERNATIONALE	45
AUTRES PAYS	46
ANALYSES DES NORMES.....	46
METHODES GENERALEMENT UTILISEES	48
DESHYDRATATION A L'AIDE D'UN FOUR A MICRO-ONDE.....	48
LES AUTRES METHODES PAR DESHYDRATATION.....	49

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

LES METHODES ELECTRIQUES RESISTIVES	50
LES METHODES ELECTRIQUES CAPACITIVES	51
SYNTHESE GLOBALE	53
EVALUATION DES METHODES.....	53
LISTE DES FABRICANTS	54
CONCLUSION	56
<u>LA GRANULOMETRIE</u>	<u>57</u>
AVANT PROPOS.....	58
RECENSEMENT DES NORMES FRANÇAISES ET EUROPEENNES.....	59
FRANCE.....	60
SUEDE	61
ANALYSE DES NORMES.....	62
SYNTHESE GLOBALE	63
EVALUATION DES METHODES.....	63
CONCLUSION	64
<u>LE TAUX DE CENDRES</u>	<u>65</u>
AVANT PROPOS.....	66
RECENSEMENT DES NORMES FRANÇAISES ET EUROPEENNES.....	67
FRANCE.....	68
INTERNATIONALE	69
SUEDE	69
ANALYSE DES NORMES.....	69
SYNTHESE GLOBALE	72
EVALUATION DES METHODES.....	72
CONCLUSION	73
<u>LA COMPOSITION OU TAUX D'ECORCES</u>	<u>74</u>
AVANT PROPOS.....	75
RECENSEMENT DES NORMES FRANÇAISES ET EUROPEENNES.....	76
METHODES UTILISEES	76
SYNTHESE GLOBALE	77
EVALUATION DES METHODES.....	77
CONCLUSION	77
<u>PERSPECTIVES</u>	<u>78</u>

DEUXIEME PHASE

REMERCIEMENTS	81
----------------------	-----------

NOUVELLES METHODES D'ANALYSE DE L'HUMIDITE	83
---	-----------

APPAREIL MICRO-ONDES	84
PRINCIPE DE LA MESURE ET PRESENTATION DU MATERIEL.....	84
PROTOCOLES DE MESURES	85
LES RESULTATS	86
ANALYSE ET CONCLUSION	87
APPAREIL INFRAROUGE	88
PRINCIPE DE LA MESURE ET PRESENTATION DU MATERIEL.....	88
PROTOCOLES DE MESURES	90
LES RESULTATS	90
ANALYSE ET CONCLUSION	91
APPAREIL DIELECTRIQUE	92
PRINCIPE DE LA MESURE ET PRESENTATION DU MATERIEL.....	92
PROTOCOLES DE MESURES	93
LES RESULTATS	94
ANALYSE ET CONCLUSION	99
EVALUATION DES METHODES ET APPAREILS	100

AUTRES RECHERCHES	102
--------------------------	------------

COMPOSITION D'UN COMBUSTIBLE BOIS (GRANULOMETRIE, ECORCES, IMPURETES)	103
REPERAGE DES FIBRES LONGUES ET FINES	103
EVALUATION DU TAUX D'ECORCE ET DES IMPURETES.....	103

PERSPECTIVES	107
---------------------	------------

ANNEXES	110
----------------	------------

NOMENCLATURE DES COMBUSTIBLES	111
ABAQUES DE CONVERSION MASSE VOLUMIQUE	112
CONTRAT D'APPROVISIONNEMENT	113
BIBLIOGRAPHIE	116

Introduction

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Avec le nombre croissant de chaufferies automatiques bois qui se développent et les différents fournisseurs potentiels, se pose la difficile question pour les exploitants de la facturation du combustible livré. Au poids ou au volume, il est évident que la facturation du bois au PCI constitue la méthode la plus fiable, encore faut-il mesurer correctement les paramètres du bois livré dont le plus important : l'humidité

L'objectif général de ce rapport est d'obtenir un guide pratique qui permette de choisir des méthodes de mesure de caractéristiques de combustibles bois déchiquetés en fonction de leur précision, de leur simplicité, de leur coût et du cas rencontré.

Les caractéristiques des combustibles concernés sont :

- le Pouvoir Calorifique Inférieur
- l'humidité
- la granulométrie
- le taux de cendres
- la composition (plaquettes sèches et humides, granulés, écorces, sciures, broyat de palettes, mélange)

Il s'agit donc dans un premier temps de recenser les modes d'échantillonnage et d'évaluer les méthodes et appareillages de mesure existants, puis dans un second temps de tester les techniques de mesure les plus adaptées à la réalité du terrain.

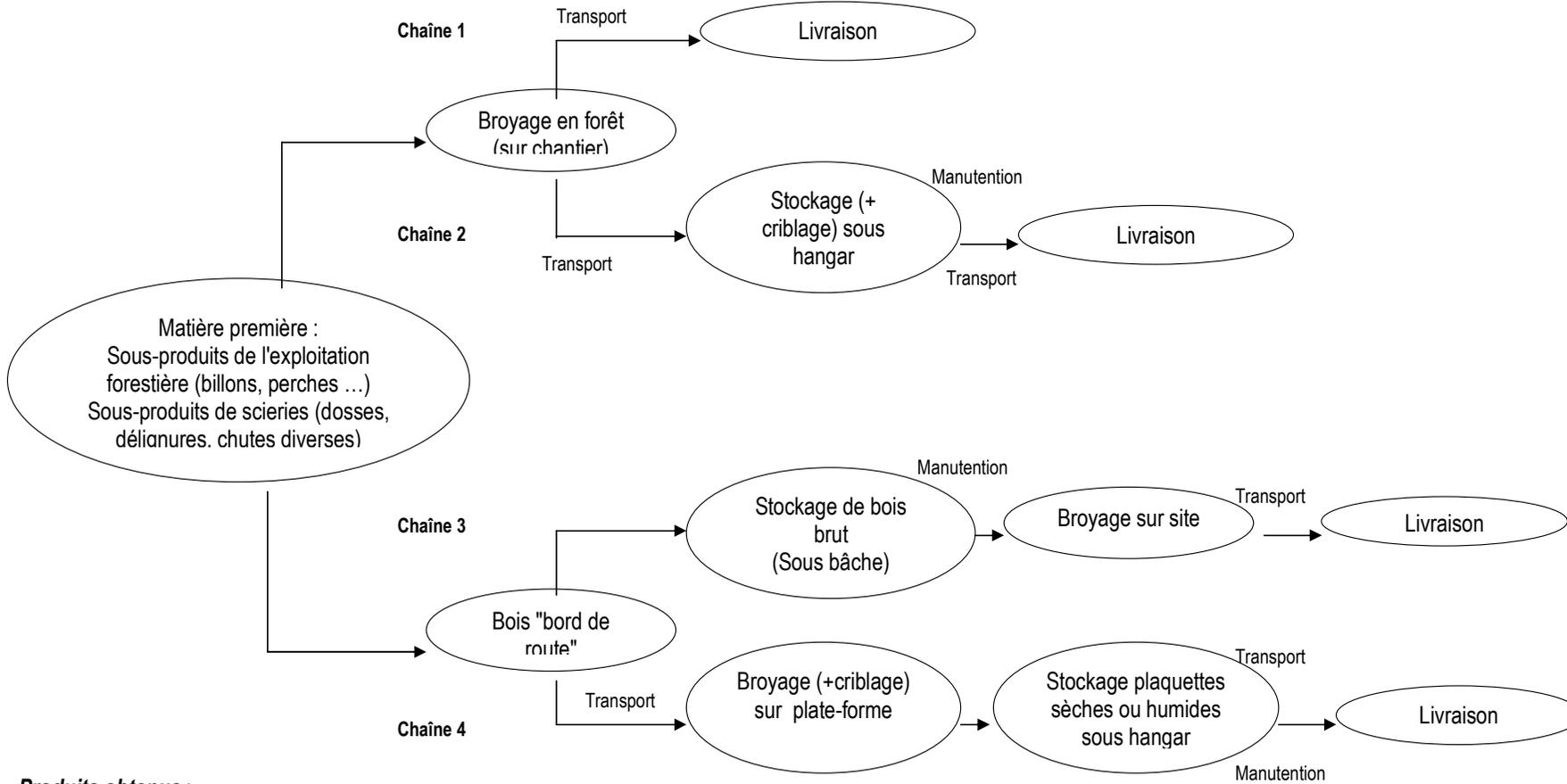
Néanmoins, avant de commencer le descriptif des normes et des méthodes de mesure, il semble essentiel de se pencher sur les logistiques d'approvisionnement et de faire l'inventaire des différents schémas de fourniture en combustible bois déchiqueté.

Plusieurs schémas de production sont envisagés en fonction de la matière première disponible au départ :

- Bois forestiers ou agricoles
- Produits connexes des entreprises de la filière bois
- Déchets Industriels Banals

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Produits forestiers :



Produits obtenus :

Chaîne 1 : la livraison se fait en flux tendu. Il s'agit d'un cas rare. Dans ce cas, le produit obtenu est de la plaquette humide (calibrée ou non).

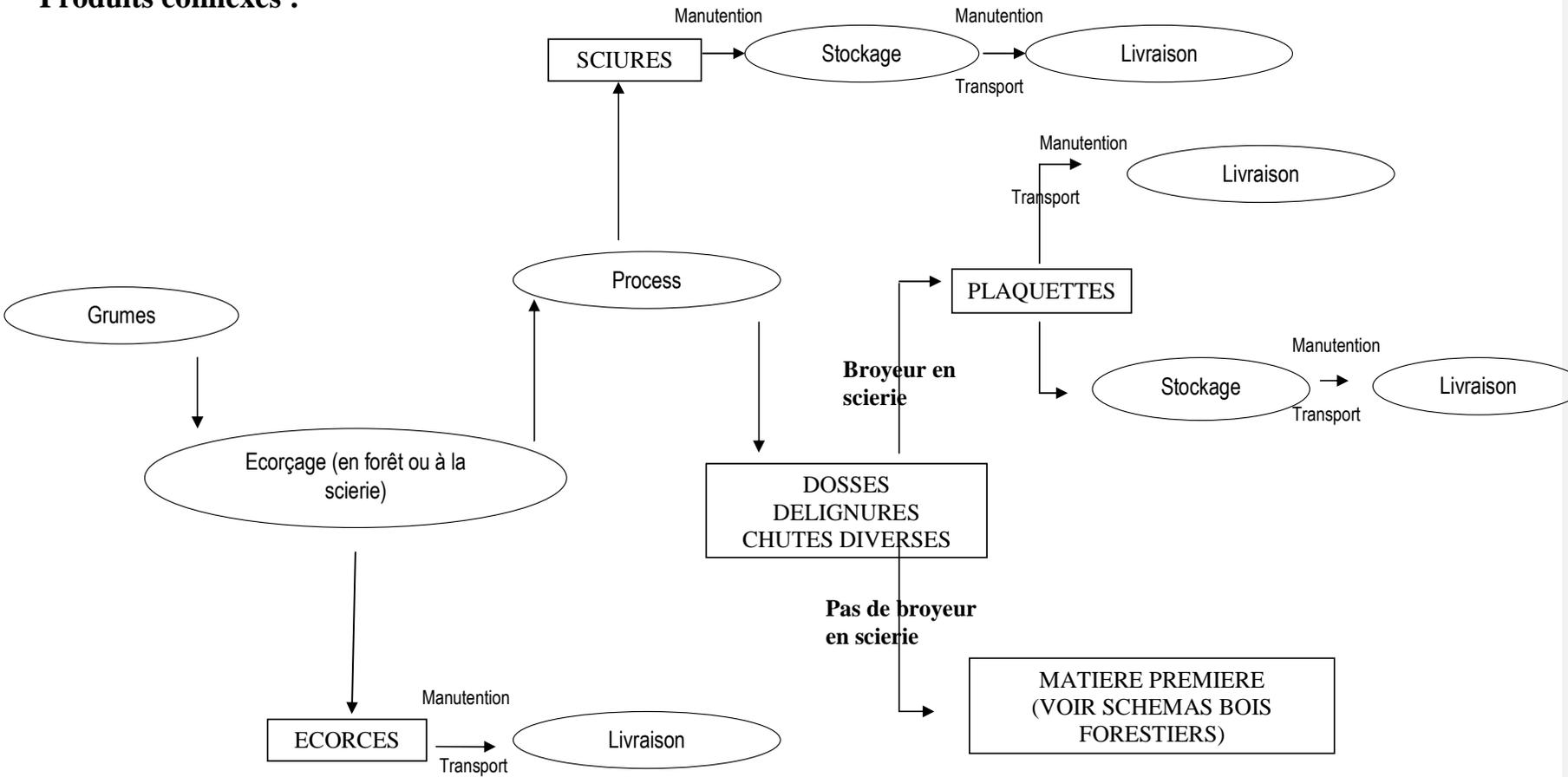
Chaîne 2 : Le produit obtenu est de la plaquette sèche (calibrée ou non).

Chaîne 3 : Le produit obtenu est de la plaquette sèche (calibrée ou non).

Chaîne 4 : Le produit obtenu est de la plaquette sèche (calibrée ou non).

Produits connexes :

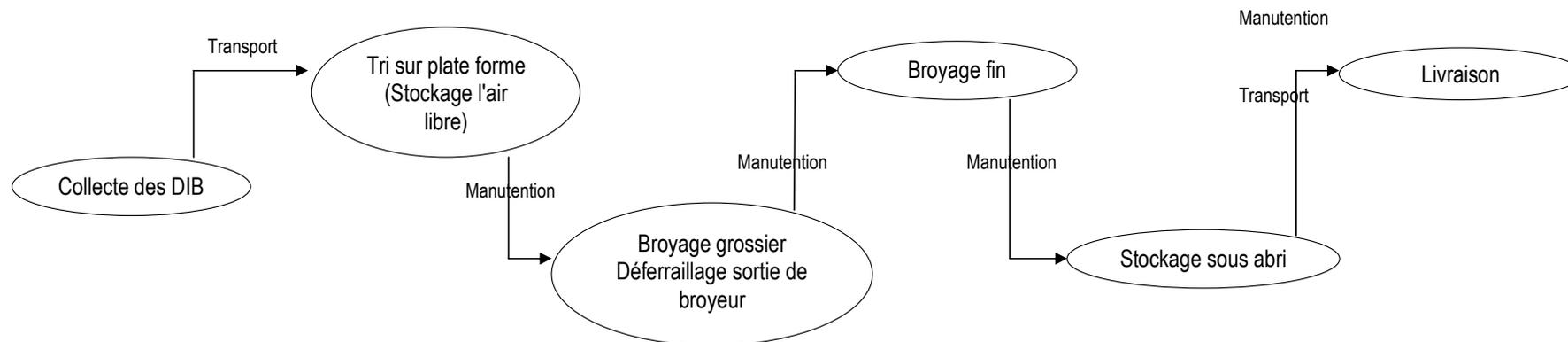
Mesure des caractéristiques des combustibles bois



Produits obtenus : écorces, sciures et plaquettes humides. Dosses, délignures, chutes diverses humides. Quelques fois, plaquettes sèches si il y a un stockage maîtrisé. Granulés et briquettes si les sciures sont envoyées chez un fabricant (annexe)

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

DIB :



Produit obtenu : plaquette sèche calibrée ou non.

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

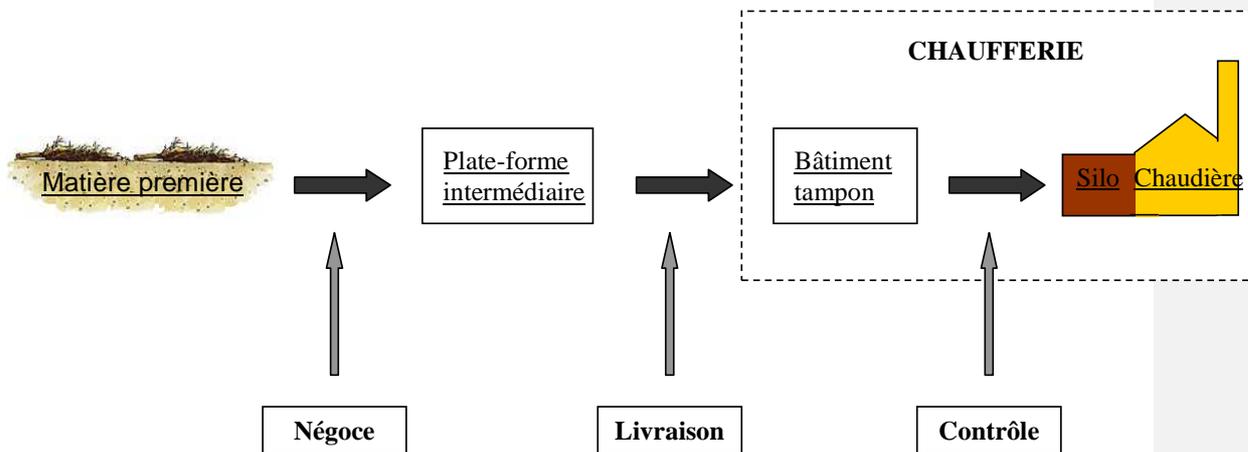
En résumé, quelle que soit la **matière première** (bois forestiers ou agricoles, produits connexes de scieries ou DIB), la teneur en **humidité** du produit (sec, humide ou vert), la **puissance** et la **technologie** de la chaudière, un seul schéma d'approvisionnement prévaut pour la fourniture de combustible bois déchiqueté :

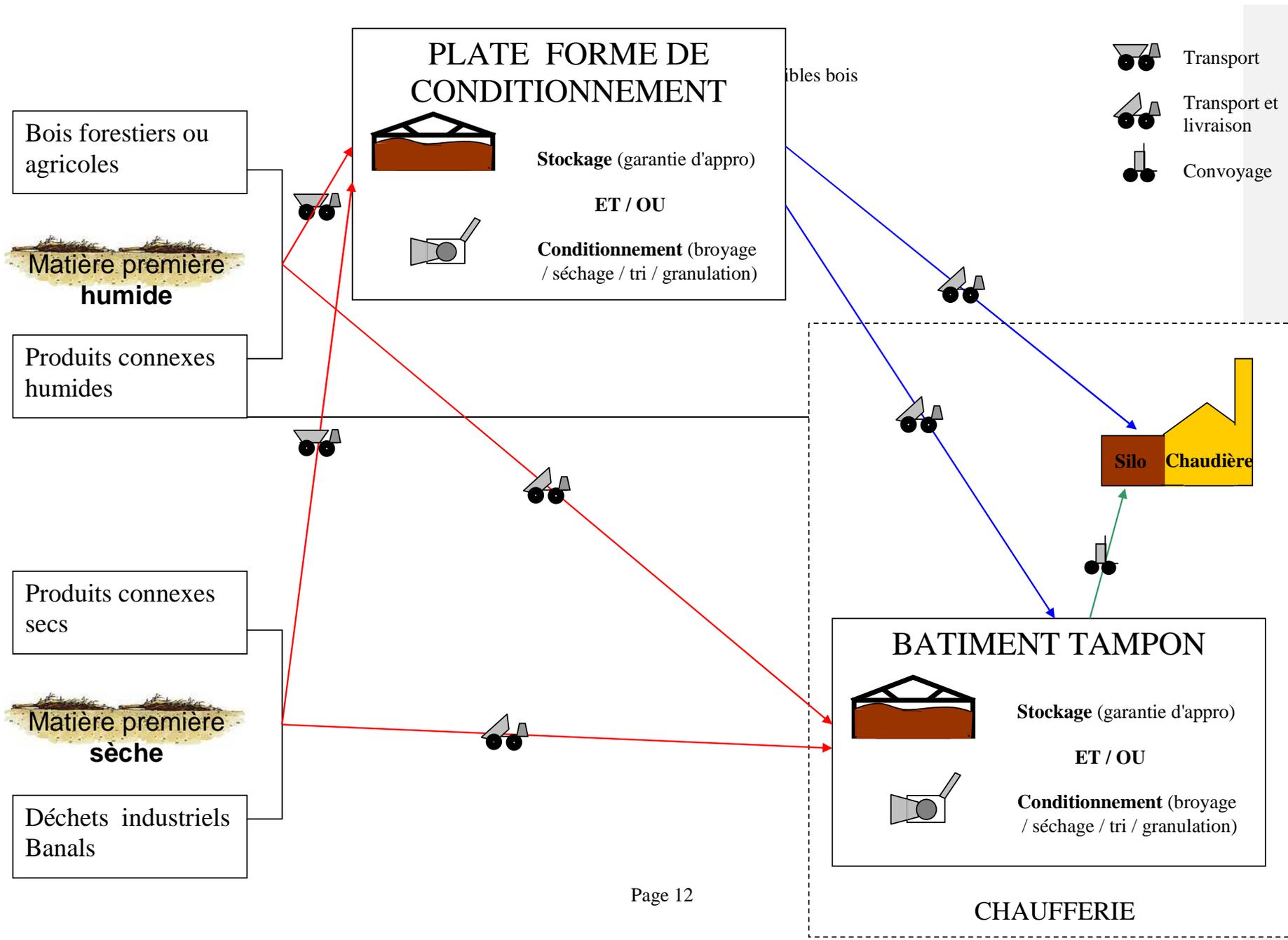
(Présentation page suivante)

En simplifiant encore ce schéma, nous pouvons symboliser sur la chaîne d'approvisionnement les périodes où les prélèvements sont réalisés.

Les mesures ou les contrôles des caractéristiques bois déchiqueté interviennent principalement en 3 étapes de la filière d'approvisionnement :

- lors du négoce des bois
- lors de la livraison pour la vérification des caractéristiques du produit fourni
- pour le contrôle par le maître d'ouvrage des caractéristiques du combustible





PREMIERE PHASE

La prise d'échantillon

Avant-propos

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

La grande variété de la composition du matériau est source d'erreur pour les prélèvements. Afin de s'en prémunir, certaines questions doivent se poser avant l'échantillonnage :

Où doit être pris l'échantillon pour être le plus représentatif possible (quelle méthode appliquée, combien de subdivision réalisées...)?

Jusqu'à quelle taille d'échantillon peut on réduire le prélèvement tout en conservant la représentation globale du lot ?

Quelle fréquence de prélèvements doit on suivre pour les prises d'échantillon (combien par jour, par tonne ...)?

En réponse à ces questions, quelques normes et méthodes usuelles d'échantillonnage sont présentées ci-dessous.

Recensement des normes et méthodes européennes

Pays	Références	Type
Allemagne	DIN 51701	Norme
Autriche	M 7135	Norme
Suède	-	Méthode
Danemark	-	Méthode

Aucune norme française ou norme internationale précise sur l'échantillonnage n'a été recensée.

Allemagne

Type..... Norme
Référence..... DIN 51701
Intitulé..... houille : prélèvement et préparation de l'échantillon
Date..... 1985

Cette norme est applicable par transcription au bois bûche et au bois déchiqueté

Mise en forme : Puces et numéros

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

1.1 - Principe

Série de division de l'amoncellement du bois collecté. Mesure des caractéristiques des échantillons obtenus.

1.2 - Appareillage

Un moyen de séparation et de transfert (pelle, saut,...)

1.3 - Mode opératoire

Un prélèvement de 120 éléments (bois bûche) ou 120 kg (bois déchiqueté) est effectué.

Le prélèvement est divisé en 3 puis en 2 puis encore en 2 jusqu'à obtenir 2 échantillons de 10 éléments ou 10 kg.

La mesure des caractéristiques des 2 échantillons est réalisée.

Autriche

Type..... Norme
Référence.....M 7135
Intitulé Briquettes et palettes :
.....prélèvement, échantillonnage et réalisation des tests

Cette norme est une norme généraliste sur la mesure des caractéristiques du bois et n'est pas spécifique à l'échantillonnage.

1.4 - Principe

Séparation de l'amoncellement en plusieurs échantillons. Mesure des caractéristiques de tous les échantillons.

1.5 - Appareillage

Un moyen de séparation et de transfert (pelle, saut,...)

1.6 - Mode opératoire

Plusieurs prélèvements (5 au minimum, tous identiques, de masse individuelle supérieure à 0,5 kg) sont effectués.

La masse de l'amoncellement initial doit être supérieure à 10 fois la masse d'un des échantillons.

La mesure des caractéristiques des échantillons est réalisée.

Mise en forme : Pucés et numéros

Mise en forme : Pucés et numéros

Mise en forme : Pucés et numéros

Suède

Type..... Méthode
Référence.....
Intitulé Bois déchiqueté:
.....prélèvement des échantillons

Mise en forme : Pucés et numéros

1.7 - Principe

Détermination de la localisation des prélèvements sur un amoncellement de bois déchiqueté.

Mise en forme : Pucés et numéros

1.8 - Appareillage

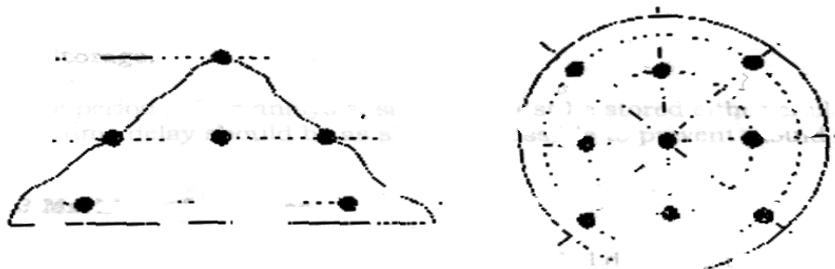
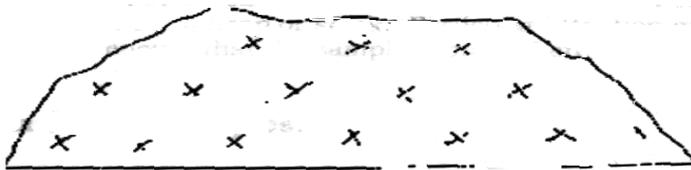
Une moyen de prélèvement (pelle, saut,...)

Mise en forme : Pucés et numéros

1.9 - Mode opératoire

Plusieurs prélèvements sont effectués à partir de schémas de localisation précis :

Mise en forme : Pucés et numéros



Disposition des points de prélèvements

Les procédures classiques d'échantillonnage sont ensuite suivies et les mesures de caractéristiques réalisées.

Danemark

Type..... Méthode
Référence.....
IntituléBois décheté:
..... préparation des échantillons

Mise en forme : Puces et numéros

1.10 - Principe

Division du lot initial en plusieurs échantillons. Mesure des caractéristiques à partir d'échantillons dont les caractéristiques de température et d'humidité ont été ramenées aux conditions ambiantes et dont la granulométrie a été affinée.

Mise en forme : Puces et numéros

1.11 - Appareillage

Un moyen de séparation et de transfert (pelle, saut,...)
Un outil de séchage (étuve, four...)
Une technique de broyage fin

Mise en forme : Puces et numéros

1.12 - Mode opératoire

Plusieurs prélèvements (10 en général, de volume individuel compris entre 1 et 10 L) sont effectués.

Les échantillons sont pré-séchés à 35°C afin d'obtenir les caractéristiques d'un élément à température et humidité ambiante (20°C, 20% sur brut). Relevé de la mesure d'eau évaporée donc perdue.

Réduction de la taille des particules élémentaires du bois jusqu'à de 30 mm d'épaisseur par broyage "doux" (sans perte d'humidité).

Séparation des échantillons en 2 groupe (1 pour la mesure d'humidité, 1 pour la mesure des autres caractéristiques générales).

Réduction par étape de la taille des broyats de bois jusqu'à la granulométrie souhaitée pour la mesure de la caractéristique générale.

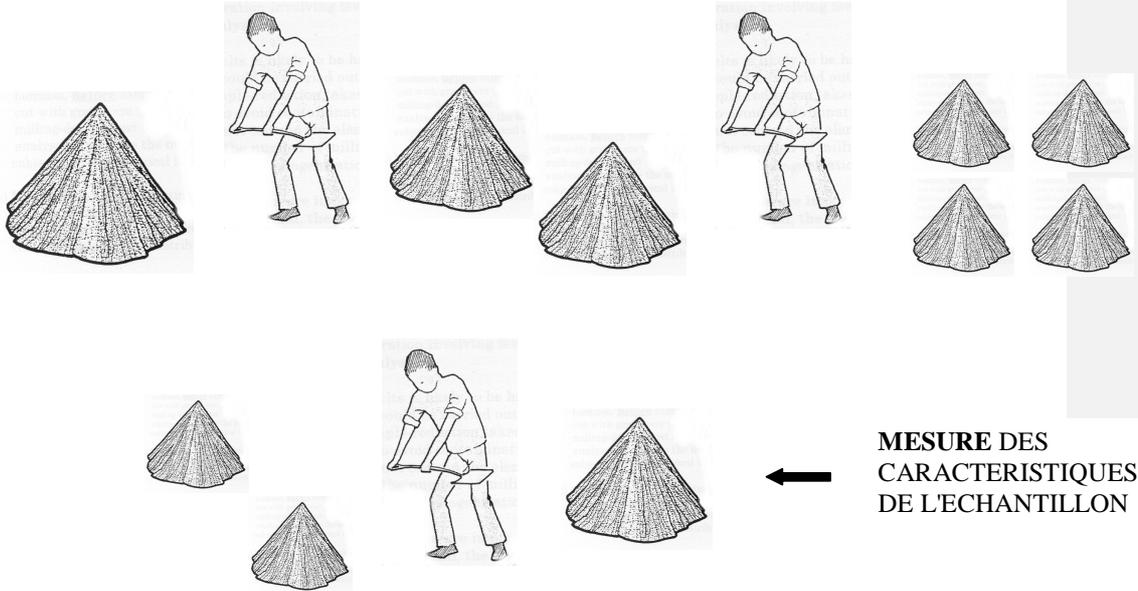
Mesure de l'humidité résiduelle dans les échantillons prévus à cet effet, déduction de l'humidité réelle dans le prélèvement initial.

Mise en forme : Puces et numéros

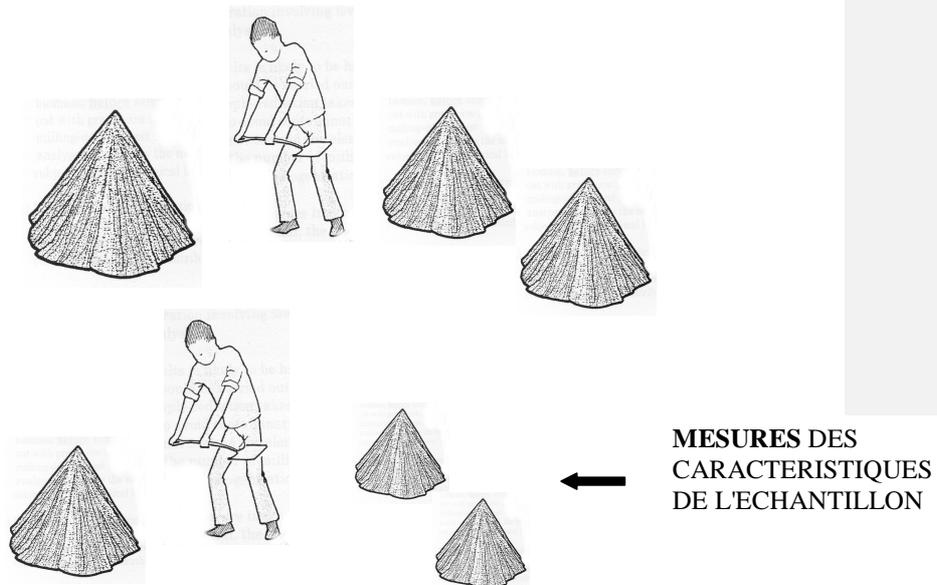
Synthèse

En résumé, deux techniques peuvent être adoptées :

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



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



Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Toutes les méthodes se rapprochent. Elles se différencient seulement par la taille, le nombre et la procédure suivie pour le prélèvement de l'échantillon.

Le broyage des échantillons indiqué dans la méthode suédoise est intéressant au niveau de l'homogénéité du prélèvement. Il induit néanmoins une modification des caractéristiques du combustible en évaporant l'eau contenue dans le bois au moment du travail mécanique.

Autrement la mesure des éléments dans les conditions ambiantes semble contraignant et pas forcément utile même si la mesure d'humidité est souvent indispensable.

Ces méthodes sont tout à fait utilisable dans le cas d'une prise d'échantillon réalisée lors d'une livraison (prise d'échantillon dans la benne où lors du dépotage). On prendra soin de prélever du combustible en au moins 5 points différents (en surface et en profondeur ou lors du dépotage en 5 phases du déversement) pour obtenir au moins 10 échantillons.

Ceci peut être réalisé en plusieurs points de la chaîne de fourniture : avant dépotage (prise d'échantillon dans la benne), pendant le dépotage (prise d'échantillon lors du déversement : on stoppe le déversement et on prélève un échantillon), dans le silo ou dans le système d'amenée du combustible (si celui-ci est accessible).

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, cette méthode n'est applicable que dans le cas d'un fournisseur unique avec un mono produit. 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 ...

Dans tous les cas, on doit obtenir un minimum de 10 échantillons prélevés en 5 points différents du combustible étudié. Les deux principes schématisés page précédente sont alors utilisables : soit on mesure les caractéristiques des 10 échantillons et on fait des moyennes, soit on mélange les échantillons pour en extraire un échantillon « moyen » sur lequel on pratique des mesures de caractéristiques.

Le pouvoir calorifique
inférieur

Avant propos

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 Supérieur (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.

➤ **Le Pouvoir Calorifique Inférieur (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.

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.

Recensement des normes françaises et européennes

Tous les pays européens n'ont pas de normes sur le sujet. 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>

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

France

Type..... Norme
 Référence..... NF M 03-005
 Intitulé..... Détermination du pouvoir calorifique supérieur
 et calcul du pouvoir calorifique inférieur
 Date..... Décembre 1990

Mise en forme : Puces et numéros

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

1.1 - Principe

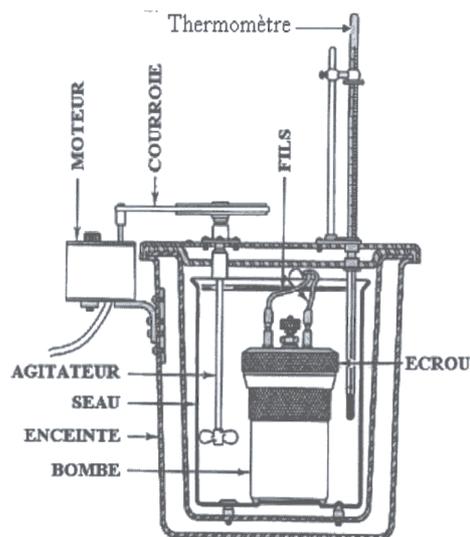
La prise d'essai est réalisée dans une bombe calorimétrique en présence d'oxygène. Le pouvoir calorifique supérieur est donc déterminé à volume constant à partir de l'élévation de température constatée compte tenu des réactions chimiques secondaires et éventuellement des pertes thermiques.

Le pouvoir calorifique inférieur est calculé ensuite à partir d'une décomposition élémentaire.

1.2 - 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



1.3 - 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)

1.4 - Expression des résultats

➤ **Pouvoir calorifique supérieur**

Le pouvoir calorifique supérieur est déterminé par la formule suivante :

$$P_y = \frac{(4,1868 * E) * (t_m - t_i + c) - (a + b)}{M}$$

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

$$P_v \text{ par } \frac{100}{100 - h_1}$$

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,

t_m = température maximale en degrés Celsius,

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

- 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 :

$$I_v = P_v - 6 \times 4.1868 h_2 = P_v - 25.1 h_2$$

Où :

- I_v 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 :

$$I_{vh} = P_v \frac{100 - h}{100 - h_1} - 6 \times 4.1868 \left[\frac{h_2 - h_1}{100 - h_1} (100 - h) + h \right]$$

$$I_{vh} = (I_v + 6 \times 4.1868 h_1) \frac{100}{100 - h_1} - 6 \times 4.1868 h$$

Pour un combustible sec, le pouvoir calorifique est :

$$I_{vs} = (I_v + 6 \times 4.1868 h_1) \frac{100}{100 - h_1} = (I_v + 25 h_1) \frac{100}{100 - h_1}$$

$$I_{vs} = P_v \frac{100}{100 - h_1} - 54 \times 4.1868 H = P_v \frac{100}{100 - h_1} - 224 H$$

Internationale

Type..... Norme
Référence..... ISO 1928 :1995
Intitulé..... Détermination du pouvoir calorifique supérieur
..... Dans une bombe calorimétrique et calcul du pouvoir calorifique inférieur
Date..... 1995

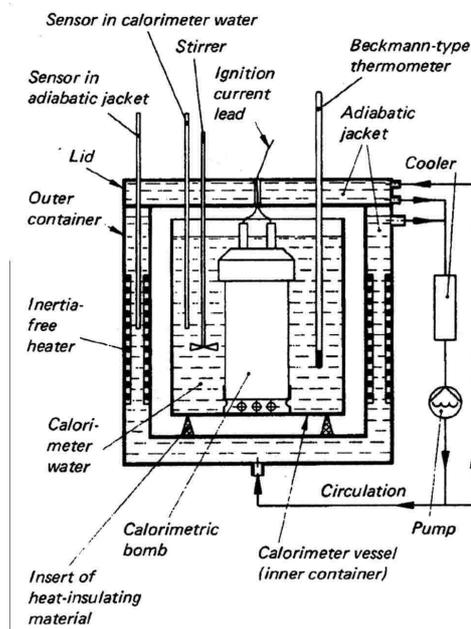
La norme française est directement issue de cette norme, les différences de protocoles sont mineures.

Allemagne

Type..... Norme
Référence..... DIN 51 900
Intitulé..... Détermination du pouvoir calorifique supérieur
..... Dans une bombe calorimétrique et calcul du pouvoir calorifique inférieur
Date..... Août 1977

Cette norme est-elle aussi très proche de la norme française, elle est un peu moins précise sur le type de matériel à utiliser.

Mise en forme : Puces et numéros



Finlande

Mise en forme : Puces et numéros

Type..... méthode
Référence..... aucune
Intitulé.....
..... Détermination du pouvoir calorifique
Date..... Août 1998

Cette méthode a été mise au point par le VTT energy, elle synthétise les normes allemandes et internationales.

Elle apporte une méthode approchée de calcul du PCI à partir du PCS en donnant des valeurs moyenne du taux d'hydrogène pour les principaux combustibles :

$$Q_{net} = Q_{gr} - 0.2181 \times th$$

où Q_{net} est le PCI exprimé en MJ/kg, Q_{gr} est le PCS exprimé en MJ/kg et th le taux d'hydrogène massique en %.

CSN ISO1928 Taux d'hydrogène moyen des principaux combustibles :

Plaquettes forestières	5.8 %
Plaquettes industrielles.....	6.1 %
Sciure	6.4 %
Ecorce de bois tendre	5.7%
Ecorce de bouleau	6.6%

Pays bas

Mise en forme : Puces et numéros

Type..... Méthode et normes
Référence..... BPM 4-04
..... NEN ISO 1928
Intitulé..... Pouvoir calorifique supérieur

La norme est NEN ISO 1928 est une traduction directe de la norme internationale.

La méthode BPM 4-04 est une synthèse des normes internationales, allemandes et américaines. Elle présente un appareil de mesure inédit : le macro-calorimètre. Cet appareil permet d'analyser des échantillons beaucoup plus importants (jusqu'à 25kg), sa précision est plus faible.

Nous n'avons pas réussi à obtenir plus d'informations à ce jour. Il n'existerait qu'un seul appareil de ce type aux Pays-bas.

Suède

Type..... Norme
Référence.....SS 18 71 82
Intitulé..... Détermination du pouvoir calorifique supérieur
..... dans une bombe calorimétrique et calcul du pouvoir calorifique inférieur

Cette norme est sensiblement la même que la norme ISO 1928 et DIN 51900.

Grande-Bretagne

Type..... méthode
Référence.....BS 1016 :1981 :part16
Intitulé..... Calcul du pouvoir calorifique effectif

Cette méthode ne donne que le mode de calcul du PCI réel à partir du PCS anhydre et du taux d'humidité.

La formule de calcul est :

$$CV_{net_{ar}} = CV_{gross_{ar}} - 0.206 H_{ar} - 0.023 (M_{ar} + 0.1A_{ar})$$

où

$CV_{net_{ar}}$	=	PCI réel (MJ/kg)
$CV_{gross_{ar}}$	=	PCS (MJ/kg)
H_{ar}	=	taux d'hydrogène (% w/w)
M_{ar}	=	taux d'humidité (% w/w)
A_{ar}	=	taux de cendres (% w/w)

Tchécoslovaquie

Type..... Norme
Référence.....
Intitulé..... Détermination du pouvoir calorifique supérieur
..... Dans une bombe calorimétrique et calcul du pouvoir calorifique inférieur
Date..... 1995

La norme française est directement issue de cette norme, les différences de protocoles sont mineures.

Mise en forme : Puces et numéros

Analyse des normes

1.5 - Analyse comparative

Toutes ces normes sont très proches, 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 (voir chapitre teneur en humidité).

Il existe une autre méthode utilisant le pouvoir comburivore (quantité d'air nécessaire pour une combustion complète d'un combustible). 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 et une décomposition élémentaire sont indispensables.

Mise en forme : Puces et numéros

Mise en forme : Puces et numéros

1.6 - 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) est important, **il 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 **18 € H.T.** dont un quart dû à la décomposition élémentaire

1.7 - Limite de la méthode

Ces protocoles ne sont quasiment pas utilisés pour le bois énergie, ceci est dû à deux principaux facteurs :

➤ **l'échantillon est trop faible**

Toutes ces mesures sont réalisées sur des échantillons de 1 ou 2 grammes. Quelles que soient les méthodes d'échantillonnage, le bois énergie est un combustible beaucoup trop hétérogène pour être ramené à un échantillon si faible.

De plus l'échantillonnage est très long pour une réduction aussi importante (l'échantillon représente 1/20 000 000 d'un camion de bois)

➤ **la méthode coûte trop chère**

Les matériels sont beaucoup trop chers pour être utilisés par un utilisateur ou exploitant. Il faut donc envoyer l'échantillon à un laboratoire spécialisé. Dans ce cas, la mesure est relativement chère en rapport de l'utilisation.

Exemple :

Un utilisateur souhaite vérifier le PCI d'une livraison d'un camion d'écorces dont le volume est de 80 m³ soit 30 tonnes. Si le PCI est de 2 200 kWh/tonne, le contenu énergétique de la livraison est donc de 66 000 kWh.

Le coût de la mesure est donc de 180 € pour le PCI et de 380 € pour l'humidité soit 0,33 centimes d'Euro par kWh.

Sachant que le prix de l'écorce est de l'ordre de 0,90 centimes d'Euro par kWh, le coût de la mesure augmente le coût de la livraison de près de 40%.

Méthodes généralement utilisées

Les protocoles normés ne sont quasiment jamais utilisés par la filière bois énergie. D'autres méthodes beaucoup moins coûteuses sont choisies par les exploitants et maîtres d'ouvrages. Elles ont comme dénominateur commun de partir de l'humidité pour calculer le PCI et de considérer que le PCI anhydre du bois est relativement constant.

Variation du PCI en fonction de l'essence

De nombreuses valeurs de PCI en fonction de l'essence sont données dans la littérature. Il s'agit la plupart de moyennes issues de mesures de laboratoires.

Le tableau ci-dessous est une moyenne de valeurs issues de documents de l'AFOCEL, CTBA, ARMEF, CETIAT, Université de Pau, Techniques de l'ingénieur et ENSTIB. Les essences ont été réparties entre feuillus et résineux et classées par superficie sur le territoire français.

Essence Feuillus	PCI en kWh/kg	Essence Résineux	PCI en kWh/kg
Chêne	5 040	Pin maritime	5 350
Hêtre	5 140	Sapin	5 320
Châtaignier	5 190	Epicéa	5 260
Charme	4 970	Pin sylvestre	5 350
Frêne	5 090	Douglas	5 290
Bouleau	5 020	Mélèze	5 400
Acacia	5 270		
Aulne	4 910		
Peuplier	4 890		
Orme	5 170		
Moyenne	5 070	Moyenne	5 330
Ecart maximum	380	Ecart maximum	60
	soit 8%		soit 1%

Supprimé: ¶

Supprimé: ¶

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

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

En effet le pouvoir calorifique d'un combustible est très étroitement lié à la teneur en carbone et en hydrogène de celui-ci. Les différentes essences de bois ayant une composition élémentaire très similaire, on explique ainsi la faible variation du PCI en fonction de l'essence.

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Formule pratique :

Pour le calcul du PCI anhydre, des formules empiriques permettent de donner une valeur fiable à partir de la connaissance de la composition élémentaire du bois :

En général, on retient les valeurs moyennes suivantes :

Carbone : 49 %,
Hydrogène : 5,5 %,
Azote : 0,2 %,
Oxygène : 45,3 %.

En prenant pour référence le PCI anhydre du bois autour de 5 000 kWh/t, on obtient différentes formules qui diffèrent sensiblement selon la nature de l'essence :

- $PCS = 108 \times C \%$ (en kWh/tonne)

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

D'où $PCI = 108 \times C - 60,5 \times H$

- $ou PCS = 109,5 \times C \%$ - 64 (en kWh/tonne)

Mise en forme : Puces et numéros

Pour être utilisée correctement, cette méthode rapide nécessite donc une analyse élémentaire du combustible afin de vérifier les valeurs moyennes de la composition du bois.

Cette analyse est d'ailleurs également nécessaire pour la mesure du PCI par la méthode de dans la méthode de référence (bombe calorimétrique).

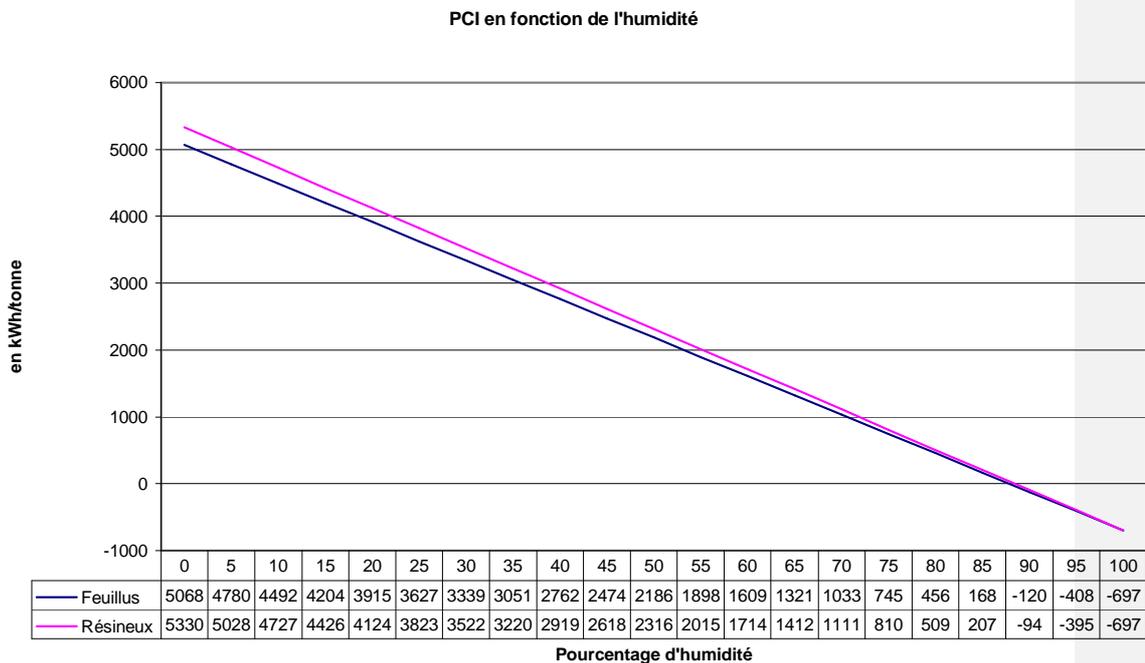
Mise en forme : Puces et numéros

2-Variation du PCI en fonction de l'humidité

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

$$\text{PCI sur brut} = \text{PCI sur anhydre} \cdot 100 - E/100 - 6 E$$

Sur la base des PCI anhydres moyens définis au chapitre précédent, les valeurs sont les suivantes :



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.

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

Des abaques convertissant directement l'humidité en PCI en fonction du type de combustible sont présentées ci-dessous.

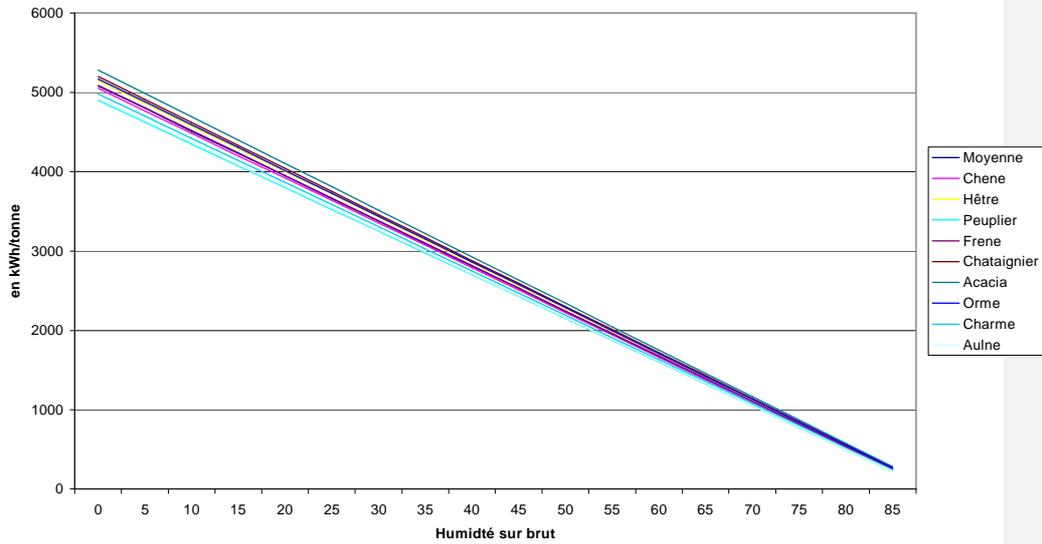
Il existe alors 2 méthodes pour le calculer :

- soit en fonction de la masse
- soit en fonction du volume (cas le plus courant mais à déconseiller)

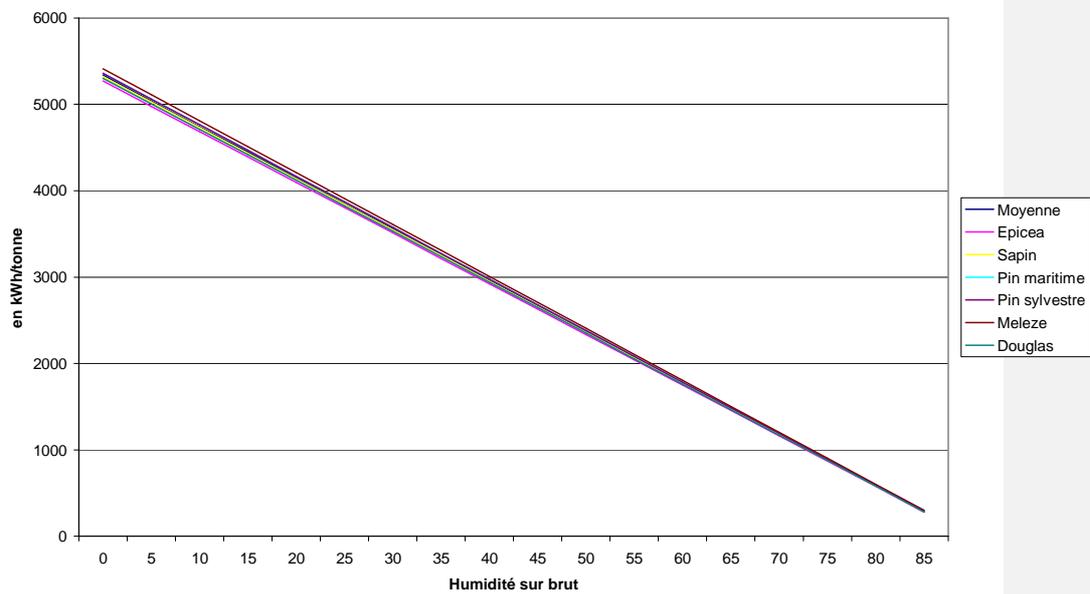
Mesure des caractéristiques des combustibles bois

EN FONCTION DE LA MASSE

PCI des feuillus en kWh/tonne



PCI des résineux en kWh/tonne



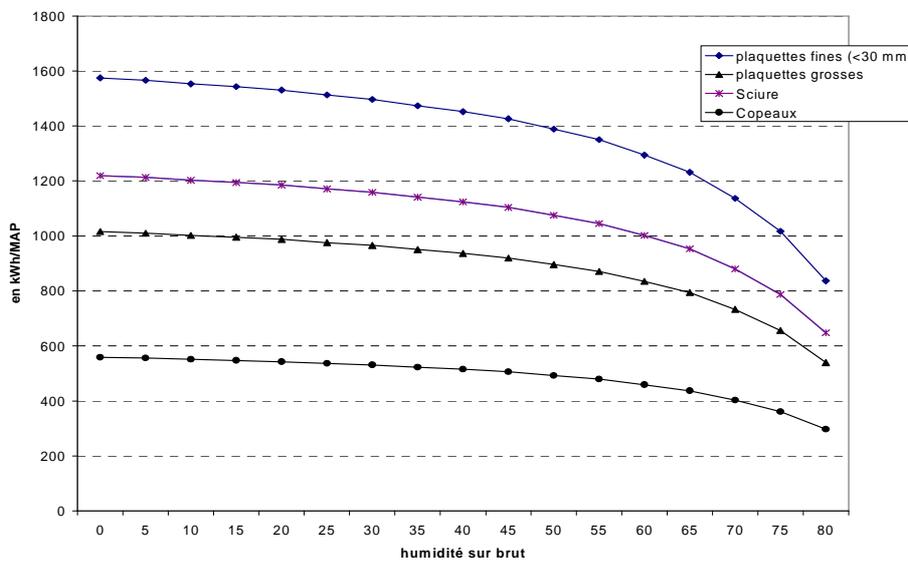
Mesure des caractéristiques des combustibles bois

EN FONCTION DU VOLUME :

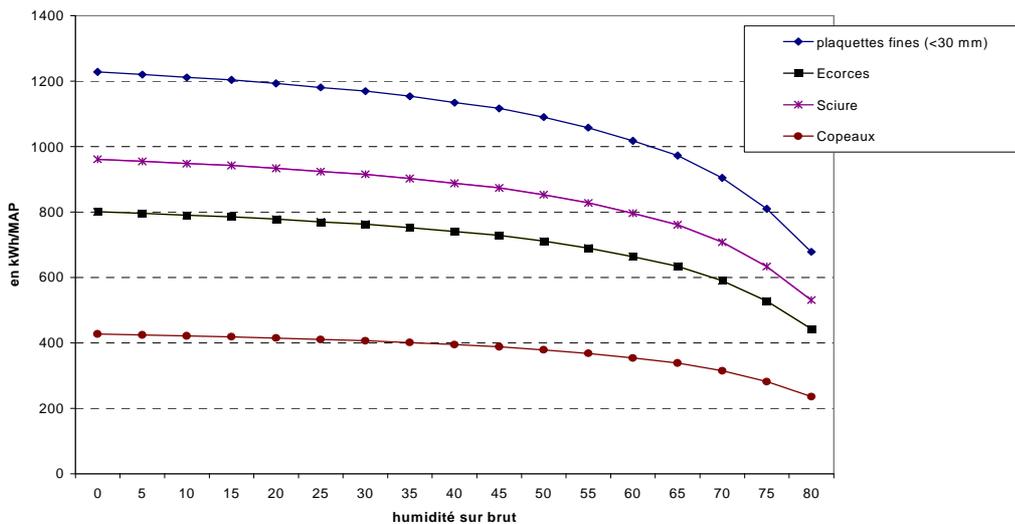
La mesure du PCI par cette abaque présente trop d'incertitude sur la valeur finale : suivant le type de bois et pour une humidité donnée, le PCI peut varier du simple au triple !. Elle nécessite donc d'avoir une bonne connaissance et une bonne régularité du ou des combustibles livré(s).

Cette méthode de calcul du PCI en fonction d'une livraison au volume **est donc à éviter aussi souvent que possible.**

PCI des feuillus en kWh/MAP



PCI des résineux en kWh/MAP



Synthèse globale

Evaluation des méthodes

Méthodes	Bombe calorimétrique	Cône calorimétrique
Norme(s)	ISO 1928-1995	ISO 5660
Domaine de validité (% d'humidité)	5 à 95 %	
Prix	Elevé	Très élevé
Mise en œuvre	Longue	Longue
Temps de réponse	Court	Court
Précision	Grande	Grande
Conservation des propriétés du produit	Non	Non
Influence de la granulométrie	Non	Non
Influence de la composition	Oui	Oui
Méthode de référence	Oui	Oui

Liste des fabricants

FISHER BIOBLOCK SCIENTIFIC

Téléphone : 03 88 67 14 14
Fax : 03 88 67 11 68
Adresse : B.P. 111 – Rue S. Brant – 67403 Illkirch Cedex

PROLABO (Merck Eurolab)

I.D.F., Nord et Est :

Téléphone : 01 45 14 89 + n°département
Fax : 01 45 14 87 80
Adresse : 54, rue R. Salengro – 94126 Fontenay-sous-Bois Cedex

Ouest :

Téléphone : 05 56 75 68 00
Fax : 05 56 75 56 91
Adresse : Z.I. du Haut Vigneau – B.P. 128 – 33173 Gradignan Cedex

Sud-Est :

Téléphone : 04 37 91 42 00
Fax : 04 37 91 99 71
Adresse : 3, cours Albert Thomas – 69416 Lyon Cedex 03

POLYLABO (Merck Eurolab)

Téléphone : 03 88 65 80 20
Fax : 03 88 39 74 41
Adresse : 10 rue de la Durance - B.P. 36 - 67023 Strasbourg Cedex 1

DESCHARMES (Elvetec Services)

Nancy :

Téléphone : 03 83 54 62 62
Fax : 03 83 54 62 60
Adresse : Z.I. Nancy-Heillecourt Est – B.P. 39 – 54181 Heillecourt Cedex

Colmar :

Téléphone : 03 89 30 10 70
Fax : 03 89 30 10 73
Adresse : 15, rue du Val-St Grégoire – 68000 Colmar

Paris :

Téléphone : 01 60 86 85 80
Fax : 01 60 86 70 74
Adresse : 2, rue G. Eiffel – Z.I. La Marinière – B.P. 11 – 91071 Bondoufle Cedex

ROUCAIRE – TOUZART & MATIGNON

Téléphone : 01 69 86 21 21
Fax : 01 69 86 21 31
Adresse : Les Ulis – 2, avenue du pacifique – B.P. 78 – 91943 Courtaboeuf Cedex

Conclusion

Négliger le facteur essence pour la détermination du PCI n'engendre donc pas une erreur importante surtout si l'essence est connue. Par contre l'humidité est absolument primordiale.

Sachant que le taux d'humidité doit être mesuré pour une mesure de PCI, le « surcoût » d'une mesure de PCI n'est donc pas très justifié au regard des incertitudes d'échantillonnage.

Ce type de méthode n'est adapté que pour des combustibles standards, si le taux d'écorces ou le taux de cendres est supérieur à la moyenne, il faudra utiliser des formules différentes.

Le taux d'écorces ne peut être déterminé que par des méthodes manuelles (aucune norme n'a été recensée) :

- Echantillonnage
- Ecorçage manuel
- mesure du taux massique ou volumique

La méthode de détermination du taux d'écorce est présentée au chapitre composition.

Méthode de référence : méthode normalisée par bombe calorimétrique.

Méthode de terrain : détermination de l'humidité et déduction du PCI par abaque PCI en fonction de l'humidité.

La teneur en humidité

Avant propos

Le bois est un matériau hygroscopique, il contient une quantité d'eau qui varie au cours du temps après l'abattage en fonction des conditions de stockage.

Lorsque l'arbre est vivant, la masse d'eau contenue dans une pièce de bois peut être du même ordre de grandeur que la masse de matière ligneuse. Cette eau a tendance à s'évaporer, pour tendre vers une humidité d'équilibre ne dépendant que de la température et de l'humidité de l'air.

Recensement des normes françaises et européennes

En France on note plusieurs normes susceptibles de s'appliquer

La première, NF B 51 004 est une norme « BOIS », elle a été rédigée dans le corpus des normes définissant les propriétés physiques et mécaniques du matériau bois, mais n'exclut pas le bois énergie.

Les normes NF M 03-002 et M 03-037 dont le titre est « combustibles minéraux solides », détermination de l'humidité et le domaine d'application est la détermination de l'humidité d'un échantillon de combustible solide naturel autre que les combustibles manufacturés, coke, charbon de bois, agglomérés à base de charbon de bois.

Pays	Références	Type
Internationale	ISO 589	Norme
France	NF M 03-002 NF B 51-004	Norme Norme
Allemagne	DIN 51 718	Norme
Finlande	-	Méthode
Suède	SS 18 71 70	Norme
<i>Etats Unis</i>	<i>ASTM E 1538</i>	<i>Norme</i>

France

1.1 - Norme de la série NF B : NF B 51-004

Type..... Norme
Référence..... NF B 51-004
Intitulé..... Bois détermination de l'humidité
Domaine d'application..... Déterminer l'humidité en vue notamment
des essais physiques et mécaniques
Date1985

➤ Principe

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

➤ Appareillage

Balance à 0,01g

Etuve ventilée permettant de maintenir la température de $103 \pm 2^\circ\text{C}$

Dessiccateur contenant une matière absorbante assurant la dessiccation de l'air pendant le refroidissement de l'échantillon avant pesage.

➤ Mode opératoire

Peser l'éprouvette

Déshydrater l'éprouvette dans l'étuve jusqu'à masse constante. La masse est considérée comme constante lorsque la perte de masse entre deux pesées successives effectuées à 4 heures d'intervalle est inférieure ou égale à 0,5% de la masse de l'éprouvette. La température dans l'étuve doit être maintenue à $102 \pm 2^\circ\text{C}$

Peser l'éprouvette anhydre, après refroidissement, mais rapidement afin d'éviter les reprises d'humidité.

➤ Expression des résultats

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

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} \times 100$$

dans laquelle

m_H : masse en grammes de l'éprouvette avant dessiccation

m_0 : masse en grammes de l'éprouvette anhydre

1.2 - Normes de la série NF M

1.2.1 - Norme NF M 03-002

Type..... Norme
Référence..... NF M 03-002
Intitulé..... Combustibles minéraux solides : détermination de l'humidité
Domaine d'application..... Déterminer l'humidité d'un combustible solide naturel, à l'exception des combustibles manufacturés, de la lignine et de la tourbe.
Date 1995

➤ Principe

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

➤ Appareillage

Balance à 0,5g

Plateaux rectangulaires résistant à la chaleur et la corrosion de 400 à 500 mm²

Etuve ventilée permettant de maintenir la température de 110 ± 5°C

➤ Mode opératoire

Prendre un échantillon de 500 g environ dont la granulométrie ne dépasse pas 20 mm.

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 110°+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 la différence de poids entre deux pesées successives soit inférieure à 1 g ou arrêter l'opération au bout de 20 heures.

➤ 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

m₁ : masse en grammes du plateau vide

m₂ : masse en grammes du plateau et de l'échantillon avant séchage

m₃ : masse en grammes du plateau et de l'échantillon après séchage

1.2.2 - Norme M 03-037

Type.....Norme expérimentale depuis plus de 10 ans
Référence.....NF M 03-002
Intitulé..... Combustibles minéraux solides :
détermination de l'humidité d'une prise d'essai pour l'analyse générale d'un
solide combustible naturel
Domaine d'application.....Déterminer l'humidité d'un combustible
solide naturel, à l'exception des combustibles manufacturés, de la lignine et de
la tourbe.
Date1990

Cette norme a été réalisée dans le but de mesurer l'humidité de certains charbons sans altérer sa composition pour pouvoir réaliser d'autre test. Elle n'est applicable au matériau bois, les échantillons devant être broyés et passer au travers d'un tamis de 20 microns.

Internationale

Type.....Projet de norme
Référence..... CEN 335 WG4 N9
Intitulé..... Détermination de l'humidité - Dessiccation en étuve
Date..... 2001

Ce projet est issu de la norme suédoise. La norme suédoise est inspirée par la norme ISO. De par son statut cette norme s'imposera aux états membres dans un délai de quelques années, il est prévu de la publier comme norme expérimentale dans un premier temps.

Cette norme est à la fois une norme de mesure, mais également une norme de calibrage de méthodes alternatives.

2-1 Principe

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

2-2 Appareillage

Balance d'une précision égale à 0,1 % du poids du plateau et de l'échantillon humide

Etuve ventilée (de 3 à 5 fois le volume d'air par heure) permettant de maintenir la température de $105 \pm 2^\circ\text{C}$

Plateaux en métal résistant à la chaleur et à la corrosion d'une surface permettant de répartir l'échantillon à une charge surfacique moyenne d'environ $1\text{g}/\text{cm}^2$.

2-3 Mode opératoire

L'échantillon doit avoir une masse comprise entre 2 et 3 kilogrammes. En cas d'impossibilité une masse inférieure peut être admise. Elle ne doit toutefois pas être inférieure à 300 g

Les échantillons doivent être livrés au laboratoire dans un conteneur étanche

Peser le plateau et l'échantillon humide

Déshydrater l'échantillon dans l'étuve jusqu'à ce que la différence de poids du plateau et de l'échantillon soit inférieure à 0,1% de la masse initiale. La durée de déshydratation entre deux pesées étant supérieure ou égale à 60 minutes.

2-4 Expression des résultats

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

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

dans laquelle

m_1 : masse de l'échantillon avant dessiccation

m_2 : masse de l'échantillon après dessiccation

Autres pays

Au niveau européen, les normes sont toutes fondées sur la dessiccation en étuve.

Analyses des normes

1.3 - Analyse comparative.

La méthodologie est comparable : déshydratation à l'air chaud de l'échantillon.

La température d'essai est variable : de 102 °C (méthode bois française) à 110°C méthodes combustible minéral française. Les autres pays ont majoritairement choisi 105 °C. L'écart lié à ces différentes températures peut être estimé à 1 point d'humidité, donc négligeable.

La taille de l'échantillon est variable : elle n'est pas précisée dans la norme bois française, 500g dans la norme combustible française et 2 à 3 kg dans la norme suédoise et le projet européen. Ces deux normes admettent de réduire à 300 g l'échantillon en cas d'impossibilité, mais les règles d'échantillonnage risquent d'être plus complexes.

L'expression des résultats est différente, la plupart des normes citées expriment le résultat en pourcentage par rapport à la masse de l'échantillon avant dessiccation, alors que la norme NF

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

B 51-004 la donne en pourcentage de la masse anhydre. L'expérience montre qu'en France les deux modes d'expression de l'humidité sont utilisés. Les professionnels du bois s'expriment généralement par rapport à la masse anhydre de l'échantillon, ceux du combustible ont plus tendance à utiliser la référence sur la masse brute de l'échantillon.

1.4 - 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

1.5 - Limite de la méthode

Ces protocoles ne sont pratiquement pas utilisés sur site par les industriels, mais quelquefois confiés à des laboratoires extérieurs.

Méthodes généralement utilisées

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 d'une part le rend coûteux, et d'autre part ne permet pas de disposer du résultat au moment de la livraison et ainsi de pouvoir opérer un contrôle aisé des approvisionnements.

La méthode alternative la plus fréquente, consiste à remplacer l'étude par un four à micro-onde.

Cette méthode a été retenue pour l'évaluation de l'humidité d'un lot de bois bûche, dans le cadre du référentiel technique « Bois bûche ».

Déshydratation à l'aide d'un four à micro-onde

1.1 - Principe

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

1.2 - Appareillage

Balance d'une précision égale à 1g

Four à micro onde

1.3 - 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.

Le pas de mesure de 1 minute 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 répètera cette mesure au moins 3 fois pour obtenir une moyenne donnant une meilleure fiabilité à la mesure.

1.4 - Expression des résultats

L'humidité sur masse humide (ou masse brute) 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.

1.5 - 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 par 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 BFB 51 004

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

Les autres méthodes par déshydratation

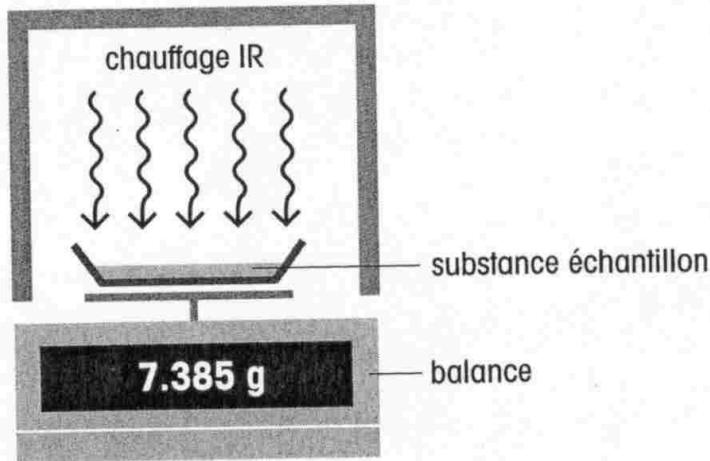
Certains fabricants d'appareils de laboratoire proposent des systèmes intégrés balance et système de déshydratation par infra rouge ou source à halogène.

L'utilisation d'une méthode de séchage par infrarouge permet d'éviter le flux d'air chaud. Le rayonnement infrarouge est absorbé directement par l'échantillon. L'énergie absorbée provoque l'échauffement de la substance et par voie de conséquence l'évaporation de l'eau.

Le rayonnement infra rouge peut être remplacé celui d'une lampe à halogène. La température recherchée est atteinte très rapidement et peut être maintenue dans une fourchette très restreinte.

Dans les deux cas, les dessiccateurs sont proposés avec une balance intégrée, permettant d'obtenir le résultat en quelques minutes.

Mesure des caractéristiques des combustibles bois



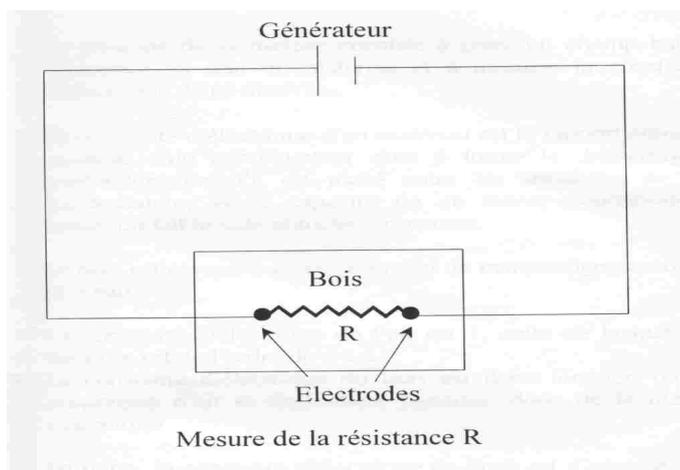
Deux inconvénients limitent l'emploi de ces technologies pour le bois énergie :

- le poids maximum de l'échantillon est faible de 20 à 100 grammes suivant les modèles
- le prix, lié d'une part à la faible diffusion de ces matériels et au niveau de précision élevé d'autre part, est également un frein à leur développement. (50 000 à 100 000 F)

Ces matériels ne sont en l'état actuel pas adaptés à la mesure de l'humidité compte tenu du poids, maximum de l'échantillon utilisable de 20 à 50 grammes.

Les méthodes électriques résistives.

Le principe de la mesure consiste à enfoncer dans le bois deux électrodes, à faire passer un courant électrique basse tension, et à mesurer la résistance du circuit électrique ainsi formé.



Mesure des caractéristiques des combustibles bois

La résistivité du bois dépend à la fois de l'essence et de son humidité. On trouve donc dans le commerce des appareils permettant de mesurer la résistivité entre deux pointes. L'appareil est calibré pour donner directement le résultat en pourcentage. Les appareils les plus répandus donnent cette valeur en % par rapport au bois anhydre.

Pour obtenir une bonne précision, il faut disposer d'un appareil disposant de cinq calibres correspondant à cinq groupes d'essences.

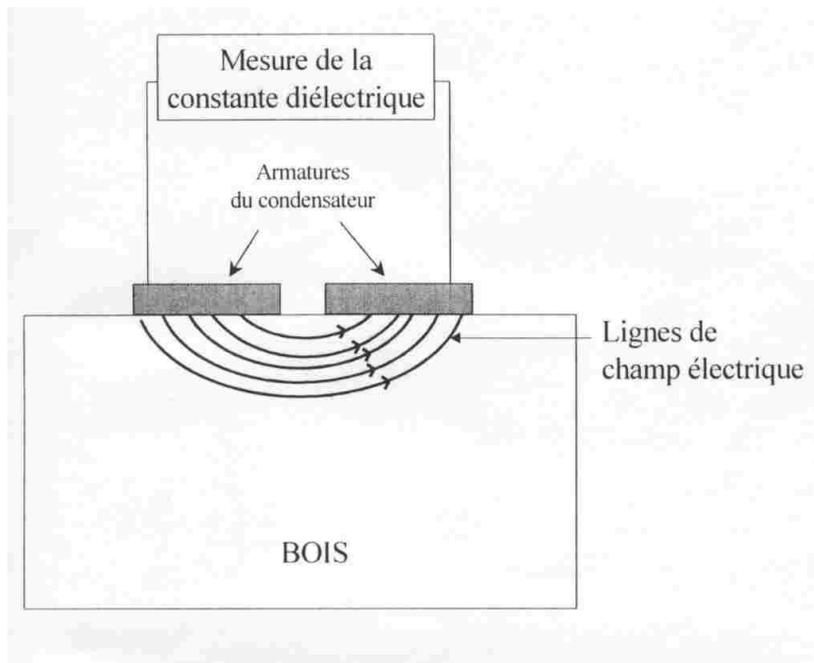
Dès que l'on dépasse le point de saturation des fibres, la mesure est peu précise et généralement sous évaluée.

Par ailleurs la distance des électrodes (en général 30 mm) ne permet pas de l'employer sur du matériau divisé.

Le nombre de prise de mesure sur un échantillon de deux à trois kilogrammes est nécessairement élevé.

Les méthodes électriques capacitives

Le principe de la mesure consiste à créer un champ haute fréquence et à mesurer la constante diélectrique du matériau.



Mesure des caractéristiques des combustibles bois

La constante diélectrique de l'air étant de 1, celle du bois anhydre de l'ordre de 4 à 5 et celle de l'eau de 80, la valeur mesurée dépendra donc :

- de l'humidité
- de l'essence
- de la masse volumique du produit foisonné.

Comme pour les appareils résistifs, la mesure est peu précise dès que le bois à une humidité supérieure au point de saturation des fibres.

1.6 - Les appareils capacitifs utilisés pour le bois matériaux

Ils sont généralement utilisés par les fabricants de meuble pour éviter de marquer le bois.

Dans le cas du bois énergie, ils ne sont capables que de donner l'humidité dans un volume compris entre les plaques. Leur emploi nécessiterait donc un grand nombre de mesure.

Il conviendrait également de les calibrer en fonction de la masse volumique foisonnée.

1.7 - L'appareil autrichien FMG 3000

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.



Le bois doit être suffisamment finement découpé afin d'éviter un foisonnement trop important. L'appareil actuel n'accepte pas les sciures, ni les écorces. Le constructeur travaille à la réalisation d'appareillage permettant la mesure sur de la sciure et de l'écorce.

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).

*Synthèse globale***Evaluation des méthodes**

Méthodes	Pesée et déshydratation			Résistivité électrique	Permittivité diélectrique
	<i>dans une étuve ventilée</i>	<i>dans un four micro-onde</i>	<i>par infra rouge ou source à halogène</i>		
Norme(s)	ISO 589	Non	Non	Non	Non
Domaine de validité (% d'humidité)	5 à 95 %	5 à 95 %	5 à 95 %	5 à 20 %	5 à 20 %
Prix	Moyen	Faible	Assez élevé	Faible	Faible
Mise en œuvre	Facile	Facile	Facile	Très facile	Très facile
Temps de réponse	Long	Court	Court	Immédiat	Immédiat
Précision	Très grande	Suffisante	grande	Moyenne	Moyenne
Conservation des propriétés du produit	Non	Non	Non	Oui	Oui
Influence de la température				Oui	Oui
Influence de la granulométrie	Non	Non	Non	Oui	Oui
Influence de la composition	Non	Non	Non	Non	Non

Liste des fabricants

1.1 - Fournisseurs d'humidimètre

A. B. HYDROMETRES SARL (GANN)	38 rue Langlois B.P. 57 91490 MILLY la FORET	Tél. 01 64 98 83 34 Fax. 01 64 98 75 56
A S PARTNER (VANICEK)	Agence Centre-Est BP 416 39106 DOLE Cedex	Tél. 03 84 70 54 16 Fax. 03 84 70 54 17
BRANDL Joseph	Corniche Normandie Niemen 06340 DRAP	Tél. 04 93 27 11 34
A B N (BROOKHUIS)	50 Route de Labege 31400 TOULOUSE	Tél. 05 62 16 28 22 Fax. 05 62 16 28 22
PROMETRON (K P M)	Le Collet Redon 54 Impasse des Lauriers 83520 ROQUEBRUNE sur ARGENT	Tél. 04 94 40 06 51 Fax. 04 94 44 01 27
URITEC (LIGNOMAT)	26a Route Nationale 68390 SAUSHEIM	Tél. 03 89 31 01 70 Fax. 03 89 31 01 79
MESUTRONIC (GANN)	19 rue de l'Hôtel de Ville 77890 BEAUMONT du GATINAIS	Tél. 01 64 29 96 30 Fax. 01 64 29 96 31
TESTO (HYGROTEST)	72 Bld HAUSSMANN 75008 PARIS	Tél. 01 43 87 80 52 Fax. 01 43 87 80 43
DOMOSYSTEM France (HUMITEST)	5 rue Le Brun 75013 PARIS	Tél. 01 45 87 22 99 Fax. 01 45 87 00 59
SWANTECH International (WAGNER , TRAMEX)	5 Place des Villes Jumelées 92230 GENNEVILLIERS	Tél. 01 40 85 88 65 Fax. 01 40 85 88 66
M C Conseil (MERLIN)	La Petite Galetière 72430 NOYEN sur SARTHE	Tél. 02 43 92 62 28 Fax. 02 43 92 62 29
SEREIC (HUMIDIBOIS)	Place de l'Eglise 18360 VESDUN	Tél. 02 48 63 06 07 Fax. 02 48 63 01 94
LENOIR (NARDI)	B.P. 79 13152 TARASCON Cedex	Tél. 04 90 91 17 71 Fax. 04 90 91 02 64
BLET S. A. (CSA électronique)	132 Faubourg St-Denis 75010 PARIS	Tél. 01 40 35 44 16 Fax. 01 40 36 77 71

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

1.2 - Fournisseurs d'étuves

Fischer Bioblock Scientific	BP 111 67 403 Illkirck cedex	Tél 03 88 67 14 14 Fax 03 88 67 11 68
Fischer Scientific S.A	BP 2 78996 Elancourt Cedex	Tél 01 30 13 24 00 Fax 01 30 13 24 24
MERCK eurolab (PROLABO)	201 r Carnot 94126 Fontenay sous Bois cedex	Tél 08 25 02 30 30 Fax 08 25 02 30 35

Conclusion

Il existe deux normes françaises sur le sujet. L'expression des résultats y est fort différente.

Le projet européen fait référence à la mesure de l'humidité sur brut. Il semble important de transformer en norme NF la norme européenne, afin de lever les ambiguïtés sur la méthode à appliquer. (Le statut de norme expérimentale ne crée pas une obligation de transcription en norme nationale). Aussi, on prendra comme méthode de référence la méthode décrite dans la future norme européenne.

Les normes existantes ont l'inconvénient d'être longue à mettre en œuvre. Les industriels devront donc disposer de méthodes simplifiées permettant d'obtenir une estimation dans un délai et un coût réduit.

D'autre part, certaines méthodes utilisées sont tirées des « normes charbon ». Celles-ci n'étant pas par définition adaptées au bois, on les évitera systématiquement.

Compte tenu de la forte hétérogénéité du matériau, il convient de développer des méthodes permettant de traiter un échantillon d'une taille suffisante. Le projet européen suggère 2 à 3 kg. A priori, les méthodes rapides par déshydratation semblent les plus pertinentes. Il conviendra toutefois de comparer leur résultat avec la méthode normalisée et de créer un système d'étalonnage tel qu'il existe pour les humidimètres électriques. La méthode en cours de développement en Autriche pourrait également se montrer pertinente sous la double condition qu'elle puisse être étendue aux écorces et aux sciures et que les résultats soient validés par comparaison à la méthode normalisée.

Méthode de référence : étuve ventilée

Méthode de terrain : micro onde

(voir analyse des méthodes page 81)

La granulométrie

Avant propos

La connaissance de la granulométrie permet à l'utilisateur d'évaluer la conformité de la livraison à ses besoins. Deux paramètres sont importants :

La proportion de fines, plus ce pourcentage atteint des valeurs élevées, plus il devient difficile de contrôler la combustion. La quantité de poussières évacuées avec les fumées dépend en grande partie du volume de fine. Un taux élevé peut être également la conséquence d'une quantité élevée d'impuretés

La proportion d'éléments d'une dimension supérieure à la dimension nominale : ces éléments peuvent provoquer des incidents dans les systèmes d'alimentation.

La répartition de la taille des éléments entre ces deux valeurs extrêmes n'a pas d'influence sur la qualité du produit livré.

Recensement des normes françaises et européennes

La plupart des pays européens ont une norme sur la détermination du taux de cendres. Les normes et méthodes recensées sont les suivantes :

Pays	Références	Type
France	NF M 03-040	Norme
Suède	SS 18 71 74	Norme
Finlande	-	Méthode
Internationale	CEN 335 WG 4 N	Norme expérimentale

L'avant projet de norme européenne est fondé sur la méthode suédoise.

France

Il n'y a pas de norme française sur les combustibles bois.

Il existe une norme NF M 03-040 relative à l'analyse de la granulométrie par tamisage de la houille qui peut être utilisé.

Type..... Norme
Référence..... NF M 03-040
Intitulé..... Houille : Analyse de la granulométrie par tamisage
Date..... Septembre 1995

1.1 - 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.

1.2 - Appareillage

Tamis à mailles rondes ou carrées :

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

1.3 - 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.

1.4 - 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.

Suède

Type..... Norme
Référence.....SS 18 71 74
Intitulé.....Détermination de la granulométrie

1.5 - 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.

1.6 - 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 adjoind 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 ± 1 g

1.7 - 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.

1.8 - Expression des résultats

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

Analyse des normes

1.9 - Analyse comparative

La norme française demande à être adaptée aux combustibles bois. Elle permet d'atteindre les objectifs fixés en préliminaire.

Le travail demandé par la norme suédoise semble quelque peu disproportionné par rapport aux objectifs préliminaires. Sa lourdeur est due essentiellement à la nécessité de réaliser au minimum quatre mesures d'humidité.

1.10 - Coût de la méthode

➤ **Matériel**

Pour la méthode française 600 à 750 € si l'on ne compte que les tamis.

Pour la méthode suédoise, il convient également de se procurer également un vibreur.

➤ **Mesures**

Pour la méthode française, 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 fais main d'œuvre hors frais de structure.

Pour la méthode suédoise, il faut ajouter quatre mesures d'humidité estimées au minimum à 45 € chacune soit 180 € environ au total.

1.11 - Limite de la méthode

La principale limitation de la méthode est due à son coût, si ce dernier semble acceptable pour la méthode française, le coût de la méthode suédoise est trop élevé. **C'est pourtant cette méthode qui risque de servir de base à la norme européenne !**

Synthèse globale

Evaluation des méthodes

Méthodes	Française	Suédoise
	Tamisage (tamis à mailles rondes ou carrées)	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
Précision	???	???
Conservation des propriétés du produit	Oui	Non
Influence de la température	Non	
Influence de la composition	Oui	Oui
Méthode de référence	Oui	Non

Conclusion

Il n'y a pas de raison à complexifier la méthode d'évaluation de la granulométrie, seule la vérification que la proportion de fines et d'éléments dont la taille est supérieure à une valeur nominale est utile. Il n'y a pas d'intérêt particulier à exprimer le résultat par rapport à la matière sèche. L'utilisation d'un système vibrant normalisé peut être un plus.

Méthode de référence : Norme NF M 03-040

Méthode de terrain : idem

Le taux de cendres

Avant propos

A l'issue de la combustion, on trouve les matières minérales véhiculées avec le combustible, le résidu de combustion qui contient encore une partie organique, essentiellement du carbone, et les matières minérales qui entraînent dans la composition du combustible.

Lors de la combustion les matières minérales subissent des transformations (déshydratation, décarbonisation). Le tableau ci-dessous montre les similitudes de composition chimique avec prédominance du calcium et potassium.

Combustible	Fraction minérale (en mg/kg)							
	Na	K	Mg	Ca	Fe	Al	Si	Ti
Sciure de résineux	9	1080	110	880	100	90	20	3
Plaquettes industrielles de résineux	40	1080	140	1420	290	130	17	10
Plaquettes forestières de taillis résineux	21	210	300	5800	100	70	6	50
Ecorces broyées	170	1010	730	21600	1720	2000	180	90

Les températures de fusibilité des divers composés compris dans les cendres sont les suivantes :

Composé	Température de fusion en °C
SiO ₂	1 715
Al ₂ O ₃	2 040
Fe ₂ O ₃	1 565
CaO	2 521
MgO	2 800
Na ₂ O	sublimation
K ₂ O	décomposé à 350 °C
TiO ₂	1 837

Les cendres peuvent donner naissance à des mâchefers dans les conditions habituelles de combustion.

La détermination du taux de cendres permet de déterminer la part réellement énergétique d'un combustible bois.

Recensement des normes françaises et européennes

La plupart des pays européens ont une norme sur la détermination du taux de cendres. Les normes et méthodes recensées sont les suivantes :

Pays	Références	Type
Internationale	ISO 1171	Norme
France	NF M 03-003	Norme
Allemagne	DIN 51719	Norme
Suède	SS 18 71 1	Norme
Finlande	-	Méthode
Pays bas	NEN ISO 1171 BPM 4-01	Norme Méthode
Grande Bretagne	BS 1016/3	Méthode
<i>Etats Unis</i>	<i>ASTM D 3174-82</i> <i>ASTM E-830-870</i>	<i>Norme</i> <i>Norme</i>

Toutes les normes sont issues de la norme internationale, exceptée la norme suédoise. Seules les normes françaises, internationales et suédoises seront présentées.

France

Type..... Norme
Référence..... NF M 03-003
Intitulé..... Détermination du taux de cendres
Date..... Octobre 1994

1.1 - Principe

L'échantillon est incinéré à l'air, suivant un régime de chauffage spécifié, jusqu'à une température de $815 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ 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.

1.2 - 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 meker avant d'utiliser le four à moufle.

1.3 - 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.

1.4 - Expression des résultats

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

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

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

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

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 :

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

Internationale

Type..... Norme
Référence.....ISO 1171
Intitulé.....Détermination du taux de cendres
Date.....Décembre 1997

La norme française est directement issue de cette norme, il n'y a aucune différence notable entre ces deux textes.

Suède

Type..... Norme
Référence.....SS 18 71 71
Intitulé.....Détermination du taux de cendres

Le mode opératoire et l'expression des résultats sont identiques à la norme ISO, seule la température d'incinération diffère : elle n'est que de 550 °C ± 10 °C.

Analyse des normes

1.5 - Analyse comparative

Toutes ces normes sont très proches, elles utilisent la même trame et le même type de matériel:

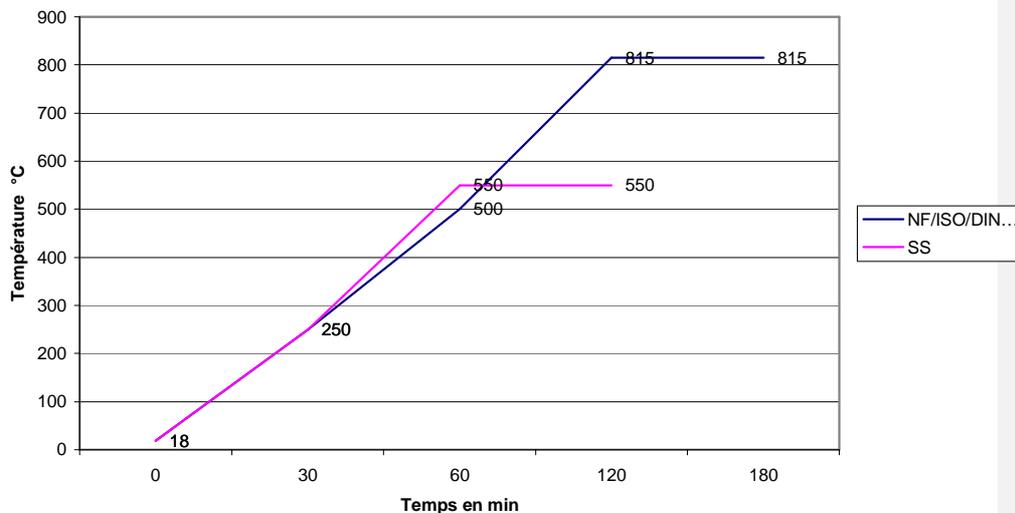
- préparation et pesée de l'échantillon,
- incinération de l'échantillon à haute température jusqu'à suppression de tous imbrûlés,
- pesée de l'échantillon après refroidissement,
- calcul du taux de cendres

Ces essais peuvent être couplés avec une mesure d'humidité (voir chapitre teneur en humidité).

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

La méthode suédoise recommande une température d'incinération beaucoup plus faible : 550°C au lieu de 815°C. En effet en dessous de 500°C, le sodium et le potassium de la biomasse sont sublimés ou évaporés, au-dessus de 600 °C, la calcination prend la place. Cette méthode permet d'obtenir un taux de cendres plus proche de la réalité, par contre elle augmente le risque d'imbrûlés donc de cycles supplémentaires.

Evolution des températures des différentes normes



D'une manière générale, il est important d'utiliser une méthode fixe pour obtenir des résultats cohérents.

1.6 - 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 important, **il 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.**

1.7 - Limite de la méthode

Ces protocoles sont peu utilisés pour le bois énergie, ceci est dû à deux principaux facteurs :

➤ **l'échantillon est trop faible**

Toutes ces mesures sont réalisées sur des échantillons de 1 ou 2 grammes. Quelles que soient les méthodes d'échantillonnage, le bois énergie est un combustible beaucoup trop hétérogène pour être ramené à un échantillon si faible.

De plus l'échantillonnage est très long pour une réduction aussi importante (l'échantillon représente 1/20 000 000 d'un camion de bois)

➤ **la méthode coûte trop chère**

Les matériels sont trop chers pour être utilisés par un utilisateur ou exploitant. Il faut donc envoyer l'échantillon à un laboratoire spécialisé. Dans ce cas, la mesure est relativement chère en rapport de l'utilisation.

Synthèse globale

Evaluation des méthodes

Méthodes	Française	Suédoise
	Incinération à l'air jusqu'à une température de 815°C ± 10 °C	Incinération à l'air jusqu'à une température de 550°C ± 10 °C
Norme(s)	NF M 03-003	SS 18 71 71
Domaine de validité (% d'humidité)	5 à 95 %	
Prix	Elevé	Elevé
Mise en œuvre	Lourde	Lourde
Temps de réponse	Long	Assez long
Précision	Grande	Grande
Conservation des propriétés du produit	Non	Non
Influence de la granulométrie	Non	Non
Influence de la composition	Oui	Oui
Méthode de référence	Oui	Non

Conclusion

La mesure du taux de cendres est très importante pour une utilisation énergétique. Si le taux de cendres est faible pour des combustibles classiques (<2%), il peut dépasser les 5% pour des écorces ou des combustibles souillés (terre, corps étrangers...). Les conséquences sur le contenu énergétique et l'exploitation de la chaufferie deviennent alors non négligeables.

Cependant les normes actuelles sont relativement mal adaptées au bois énergie, des méthodes utilisant des échantillons plus importants sont à définir.

Méthode de référence : Norme NF M 03-003

Méthode de terrain : idem

(Sur le terrain, on peut également procéder par analyse de la quantité de cendres produites par une chaufferie en fonction de la quantité de combustible livré. Cette analyse permet de déceler des anomalies du taux de cendres mais n'est pas concluante sur les raisons de ces anomalies : peut être est-ce du au combustible, mais alors à quelle livraison ou fournisseur précisément ? mais peut être est-ce du à des imbrûlés engendré par un réglage imparfait de la combustion de la chaudière ...).

La composition ou taux
d'écorces

Avant propos

Le pourcentage d'écorce dans une livraison est intéressant à connaître d'une part pour savoir, si le combustible est bien adapté à la chaudière. Un chiffre élevé peut être un indicateur de présence d'impuretés.

Le taux d'écorce sur un arbre est varié en fonction de l'essence, du diamètre et des conditions de croissance.

Une étude réalisée par le CTBA et l'AFOCEL a permis d'estimer en moyenne le taux d'écorce des bois d'industries à 10% pour le hêtre et 19% pour le chêne.

Une autre étude conduite sur les résineux montre un taux d'écorce moyen des petits bois d'épicéa de 11% en Franche Comté et de 17% dans le massif vosgien.

Voici une synthèse des taux d'écorce donnés par la littérature :

	Taux d'écorce %
Chêne	19
Hêtre	10
Sapin	15
Epicéa	15
Pin Maritime	27
Douglas	15
Pin sylvestre	16
Méleze	19

Attention : ces chiffres s'appliquent dans le cas de bois ronds. A titre d'exemple, on ne peut les appliquer à des dosses et délignures non écorcées puisque dans ce cas le taux de bois par rapport à l'écorce sera beaucoup plus faible et donc le taux d'écorce plus élevé.

Recensement des normes françaises et européennes

Il n'y a pas de méthode normalisées sur le sujet.
Il n'y en a pas en préparation.

Méthodes utilisées

1.1 - Sur les bois ronds

Les études CTBA et AFOCEL citées ci dessus étaient réalisées en mesurant le diamètre milieu du bois rond sur écorce. Après annélation au niveau de la partie centrale on mesurait le diamètre sous écorce

Les résultats sont exprimés

$$t = 100 \times (d1^2 - d2^2) / d1^2$$

où

d1 représente le diamètre sur écorce

d2 représente le diamètre sous écorce

1.2 - Sur les bois fractionnés

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.

1.3 - Analyse de la méthode

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

Les pays nordiques utilisent comme appréciation de la qualité du produit la granulométrie. Il existe quatre classes de produit dont la granulométrie est définie ainsi

	Plaquettes	Sciures	Ecorces
P1	30	5	60
P2	45	10	100
P3	60	20	200
P4	100	30	illimitée

Les valeurs sont satisfaites si 95% de la population est en dessous de la valeur fixée en mm.

Synthèse globale

Evaluation des méthodes

Méthode	Manuelle
Norme(s)	Non
Domaine de validité (% d'humidité)	5 à 95 %
Prix	Gratuit
Mise en œuvre	Facile
Temps de réponse	Long
Précision	Très grande
Conservation des propriétés du produit	Oui
Influence de la température	Non
Influence de la granulométrie	???
Méthode de référence	Oui

Conclusion

Méthode de référence : Méthode manuelle

Méthode de terrain : idem

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Perspectives

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

L'analyse des méthodes actuelles a permis de mettre en évidence quelques grands axes de recherche pour la deuxième phase des travaux.

Concernant le Pouvoir Calorifique d'un combustible bois, la caractéristique humidité est prépondérante. Sa mesure est essentielle pour la détermination du PCI. Le taux d'écorce influe aussi sur la mesure.

Concernant le taux d'humidité, un effort en terme de communication est nécessaire afin d'uniformiser le langage du bois énergie. En opposition à l'utilisation de la teneur en humidité sur anhydre en bois matériau, les chauffagistes parlent communément de teneur en humidité brut pour un combustible bois. La rédaction du guide pratique devra tenir compte de cette écriture pour conserver une homogénéité vis à vis du grand public.

Autrement, les méthodes rapides de déshydratation semblent les directions d'avenir pour la détermination de l'humidité sur brut. Les recherches sur le micro-onde et des matériels de type FMG 3000 sont les plus prometteuses.

Concernant la granulométrie, la mesure est utile principalement pour la détection des fines et des éléments de trop grande taille avant l'alimentation des chaudières. Pratiquement, la classification des produits par catégories de combustible n'est pas indispensable pour le guide pratique.

Concernant la composition, seul la mesure du taux d'écorce est désiré. Des exemples photographiés (0%, 10%, 20%, 30%) peuvent être une alternative à la méthode manuelle qui est lourde à mettre en place.

Concernant le taux de cendres, sa détermination est très importante dans le cadre de l'utilisation énergétique du bois car elle est un moyen de vérification d'autres caractéristiques (taux d'écorce donc PCI).

Enfin, toutes ces déterminations de caractéristiques doivent être couplées avec une réflexion substantielle sur la prise d'échantillon. Les préoccupations principales concernent la représentativité du prélèvement et la taille de l'échantillon qui doit être adaptée à la méthode de mesure choisie. L'intégration des conditions et des moyens de prélèvement propres au site de mesure (matériel de fourniture, moyens de contrôle, nombre de fournisseurs...) ne doit pas être non plus négligée...

DEUXIEME PHASE

Remerciements

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Nous tenons à remercier les entreprises et organismes suivants pour nous avoir prêté du matériel ou autorisé à prélever des échantillons :

- Compagnie Française du Panneau à Saint Loup sur Semouse (70)
- Association Grenobloise Etude Développement Energie Nouvelles à Grenoble (38)
- Scierie Tonnerieux à Epinal (88)
- Scierie Virion à Domèvres sur Durbion (88)
- Scierie Gaiffe à Granges sur Vologne (88)
- Bois France Sciage à Angomont (54)
- Office National des Forêts de Meurthe et Moselle
- Coopérative Forestière Lorraine
- Communes de Uzemain et La Chapelle au Bois (88)

Nouvelles méthodes
d'analyse de l'humidité

Appareil micro-ondes

Principe de la mesure et présentation du matériel

Les essais comparatifs ont été réalisés à l'aide d'un four à micro-onde type électroménager d'une puissance nominale de 1100 W restituant une puissance utile dans le four de 700 W.



Cet appareil a un coût de 300 € H.T.

Le bois est déposé dans une coupelle, desséché par période de 1 minute, 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 $0,3 \text{ g/cm}^2$ au maximum ($0,1 \text{ g/cm}^2$ pour les copeaux).



Protocoles de mesures

L'appareil a été testé sur les échantillons suivants :

- Plaquettes forestières de granulométrie moyenne origine ONF
- Déchets de palettes de granulométrie moyenne origine Uzemain
- Sciure de scierie origine Gaiffe
- Sciure et copeaux de raboterie origine Gaiffe
- Ecorces de feuillus origine Virion
- Ecorces de résineux origine Gaiffe

Suivant le combustible, les mesures sont réalisées sur 1, 2 ou 3 classes d'humidité.

Les résultats sont comparés à la méthode de référence. Les mesures normalisées sont réalisées dans une étuve ventilée à 103°C. Le séchage dure 48 heures.

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Les résultats

51 tests et 45 mesures de références ont été réalisés :

Type	Origine	Référence					Micro-ondes				
plaquettes forestières	ONF	0%	0%	0%			14%	10%	3%		
plaquettes forestières	ONF	28%	26%	27%	28%	27%	30%	40%	28%	28%	32%
plaquettes forestières	ONF	35%	38%	42%	43%		57%	66%	30%	69%	
déchets de palettes	Uzemain	16%	16%	16%	17%	15%	20%	23%	21%	23%	17%
sciures	Gaiffe	0%	0%	3%	0%		8%	8%	10%	8%	
sciures	Gaiffe	53%	53%	53%			44%	52%	49%		
copeaux	Gaiffe	14%	14%	13%	13%	13%	27%	13%	14%	22%	14%
écorces feuillus	Virion	1%	1%	2%	1%		9%	5%	5%	5%	
écorces feuillus	Virion	40%	41%	43%			45%	44%	41%		
écorces feuillus	Virion	52%	46%	56%			55%	57%	58%		
écorces résineux	Gaiffe	1%	1%	1%			7%	8%	3%		
écorces résineux	Gaiffe	33%	33%	32%	32%	37%	39%	39%	36%	43%	35%
écorces résineux	Gaiffe	52%	47%	73%	51%		58%	51%	52%	50%	

Les principaux éléments sont donc les suivants :

Type	Origine	Réf.	Ecart réel	M. O.	Ecart réel
plaquettes forestières	ONF	0%	0,0	9%	6,0
plaquettes forestières	ONF	27%	0,8	32%	5,0
plaquettes forestières	ONF	40%	3,7	56%	17,7
déchets de palettes	Uzemain	16%	1,0	21%	2,0
sciures	Gaiffe	3%		9%	1,0
sciures	Gaiffe	53%	0,0	48%	4,0
copeaux	Gaiffe	13%	1,0	17%	4,0
écorces feuillus	Virion	1%	1,0	6%	2,0
écorces feuillus	Virion	42%	1,3	43%	2,1
écorces feuillus	Virion	51%	5,0	58%	7,4
écorces résineux	Gaiffe	1%	0,0	6%	3,0
écorces résineux	Gaiffe	33%	2,1	38%	3,1
écorces résineux	Gaiffe	56%	11,7	53%	3,6

L'écart réel pour les mesures effectuées avec la méthode normalisée est inférieur à celui de la méthode avec le micro-ondes.

Les échantillons dont l'humidité est très faible ont été séchés avant essai. Malheureusement, ils ont été tant séchés que le taux d'humidité est proche de 0 %. Tous les résultats se ressemblent donc. On s'aperçoit qu'à l'exception des plaquettes, les mesures ne diffèrent pas plus de 5 points.

Cet écart de 5 % se retrouve pour les produits qui n'ont subi aucune transformation depuis leur collecte (sciures, copeaux et broyats de palette ou plaquettes forestières moyennement humides).

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Les taux d'humidité forts ont été obtenus en humidifiant le matériel collecté. L'analyse des écarts type montre que le mélange a perdu de son homogénéité. Les résultats sont à prendre avec prudence.

Une série d'essais complémentaires a donc été effectuée. En voici les résultats :

Type	Réf.	M. O.	Moyenne MO	Ecart
plaquettes scierie résineux	60%	60%	60%	0,5
		59%		
		60%		
sciures	43%	40%	41%	1,6
		42%		
		41%		
écorces feuillus	34%	31%	31%	2,5
		31%		
		31%		
écorces résineux*	39%	44%	41%	-1,7
		39%		
		39%		

*premier échantillon brûlé au micro onde

Ces essais complémentaires montrent que la méthode micro ondes reste valide avec n'importe quel type de combustible. Les écarts avec la méthode de l'étuve ventilée sont inférieurs à 5 %.

Analyse et conclusion

- Les mesures avec le micro-onde sont précises à plus de 5% près.
- Cette méthode permet d'identifier des combustibles secs et des combustibles plus ou moins humides avec une précision relativement médiocre.
- La mesure est obtenue en 10 à 20 minutes (au lieu de 24 heures dans le cas de la méthode normalisée).
- Son coût est accessible

La méthode par micro onde peut donc être utilisée comme méthode de terrain.

Appareil infrarouge

Principe de la mesure et présentation du matériel

Le calcul du taux d'humidité est identique à celui utilisé dans les normes : il détermine la quantité d'eau comprise dans l'échantillon par différence entre la masse brute et la masse sèche.

Les formules sont les suivantes :

$$Pb = \frac{M - Ms}{M}$$

Où

Pb est le pourcentage d'humidité sur brut

M est la masse de l'échantillon

Ms est la masse anhydre de l'échantillon

Et

$$Ps = \frac{M - Ms}{Ms}$$

Où

Ps est le pourcentage d'humidité sur sec

M est la masse de l'échantillon

Ms est la masse anhydre de l'échantillon

Les appareils à infrarouge utilisant des lampes infrarouges pour sécher l'échantillon jusqu'à sa masse anhydre. La puissance est variable en fonction du type d'échantillon et de son humidité. Le chauffage s'arrête automatiquement lorsque la masse est stabilisée.

Ces matériels sont des matériels de laboratoire, ils sont coûteux, fragiles et demandent un étalonnage et une phase d'adaptation pour l'opérateur pour optimiser les temps de mesure sans brûler les échantillons.

Etant principalement destinés aux entreprises de la filière bois, ces appareils indiquent une humidité sur sec.

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

L'appareil testé est un ULTRA X 2081 utilisé par la Compagnie Française de Panneaux pour vérifier essentiellement le taux d'humidité des sciures.



Les copeaux sont chauffés par deux lampes de 100 Watts dont l'intensité peut être portée de 0 à 100%.

La pesée est réalisée sur une balance précise à 0.001g. Les échantillons ne peuvent dépasser 100 grammes. Les essais sont réalisés en général sur des échantillons de 20 à 50g.

L'arrêt automatique de la mesure peut être paramétré avec une précision de 4, 8 ou 16mg. Les mesures sont effectuées toutes les 10 ou 20 secondes.

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

Protocoles de mesures

L'appareil a été testé sur les échantillons suivants :

- Plaquettes forestières de granulométrie moyenne
- Déchets de palettes de granulométrie moyenne
- Sciure de scierie
- Sciure et copeaux de raboterie
- Ecorces de feuillus

Faute de disponibilité, les plaquettes forestières de granulométrie fines et importantes n'ont pas été testées. Les écorces de résineux ont une granulométrie beaucoup trop grossière pour ce type d'appareil.

Les quantités de combustibles mesurées étant très faibles, plusieurs échantillons ont été prélevés et mesurés. Les résultats ont été comparés à la méthode de référence.

Les temps moyens de mesures ont été relevés.

Les résultats

18 tests et 20 mesures de référence ont été réalisés :

Type	Origine	Référence			Ultra X		
plaquettes forestières	ONF	22.5%	23.8%		23.6%	0.0%	0.0%
plaquettes forestières	ONF	38.3%	39.5%	38.6%	36.9%	36.7%	38.3%
plaquettes forestières	ONF	45.1%	45.6%	44.5%	42.8%	45.3%	0.0%
déchets de palettes	Uzemain	20.5%	20.7%	20.3%	20.2%	0.0%	0.0%
déchets de palettes	Uzemain	46.5%	45.6%	46.6%	48.7%	0.0%	0.0%
sciure	Gaiffe	36.4%			35.7%	35.7%	0.0%
sciure	Gaiffe	48.5%	48.9%		48.5%	48.7%	48.1%
sciure	Gaiffe	53.4%	51.2%		53.0%	0.0%	0.0%
copeaux	Gaiffe	16.1%			15.7%	15.5%	15.9%
écorces feuillus	Virion	45.0%			43.9%	0.0%	0.0%

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Les principaux éléments sont donc les suivants :

Type	Origine	Réf.	Ultra X	Ecart	Temps en min.
plaquettes forestières	ONF	23.2%	23.6%	2.0%	40
plaquettes forestières	ONF	38.8%	37.3%	-3.9%	60
plaquettes forestières	ONF	45.1%	44.1%	-2.2%	85
déchets de palettes	Uzemain	20.5%	20.2%	-1.5%	10
déchets de palettes	Uzemain	46.2%	48.7%	5.3%	25
sciure	Gaiffe	36.4%	35.7%	-1.9%	5
sciure	Gaiffe	48.7%	48.4%	-0.6%	10
sciure	Gaiffe	52.3%	53.0%	1.3%	15
copeaux	Gaiffe	16.1%	15.7%	-2.4%	5
écorces feuillus	Virion	41.0%	43.9%	7.0%	40

La précision de cet appareil est très intéressante pour une utilisation bois énergie surtout pour des échantillons relativement secs.

Par contre, les mesures sont relativement longues pour des échantillons épais comme les écorces et surtout pour les plaquettes forestières.

Analyse et conclusion

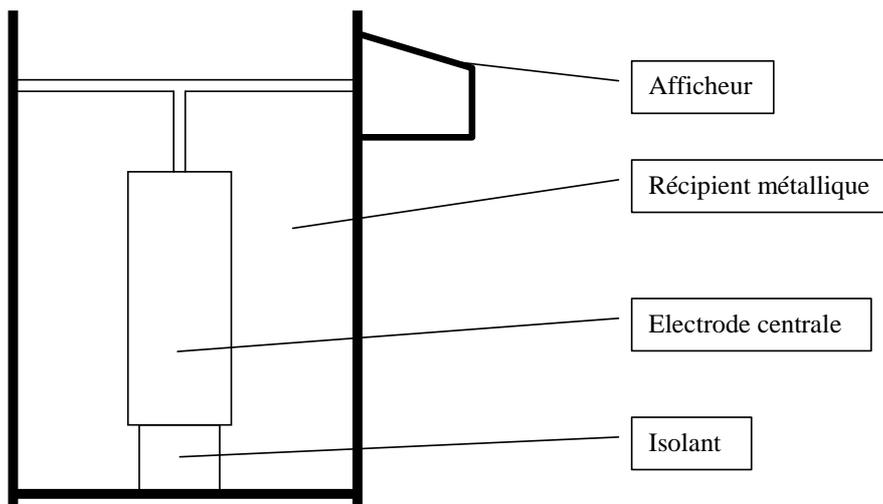
Si les résultats sont très satisfaisants, ce type d'appareil reste relativement mal adapté au bois énergie :

- Il ne peut être utilisé qu'en laboratoire
- Il utilise des échantillons très faibles ce qui exclut les granulométries importantes (la plupart des écorces, certaines plaquettes forestières).
- Les temps de mesure peuvent devenir très longs pour certains échantillons.
- Son coût est prohibitif

Appareil diélectrique

Principe de la mesure et présentation du matériel

L'appareil testé est un FMG 3000 fabriqué par la société autrichienne Pandis GmbH. Il utilise une mesure diélectrique pour déterminer l'humidité d'un échantillon.



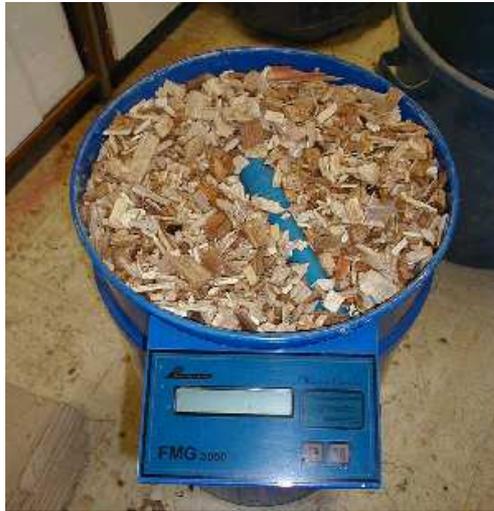
Le récipient métallique correspond à un condensateur. L'électrode externe est le revêtement métallique du récipient, l'électrode interne est située au milieu du récipient et est isolée de l'extérieur. Le principe de mesure repose sur les changements de fréquence d'un oscillateur causés par le bois humide.

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

Le coût de cet appareil est de 1 800 € H.T.



Mesure des caractéristiques des combustibles bois



Protocoles de mesures

L'appareil a été testé sur les échantillons suivants :

- Plaquettes forestières de granulométrie fine origine La Chapelle au bois
- Plaquettes forestières de granulométrie moyenne origine ONF
- Plaquettes forestières de granulométrie importante origine COFOLOR
- Plaquettes de scierie origine Tonnerieux
- Déchets de palettes de granulométrie moyenne origine Uzemain
- Sciure de scierie origine Gaiffe
- Sciure et copeaux de raboterie origine Gaiffe
- Ecorces de feuillus origine Virion

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Les résultats

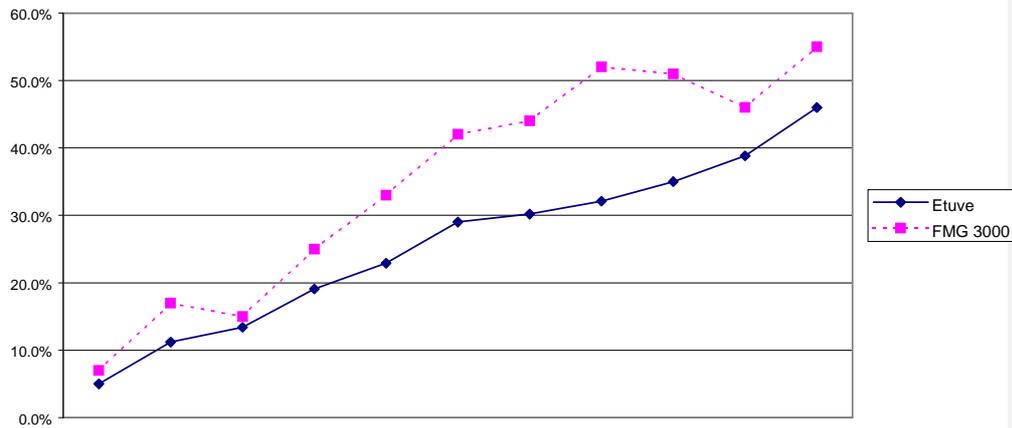
35 tests et 35 mesures de référence ont été réalisés :

Type	Origine	Etuve	FMG 3000	Ecart
plaquettes forestières fines	La Chapelle au bois	14.5%	14.0%	-3.4%
plaquettes forestières moyennes	ONF	5.0%	7.0%	40.0%
plaquettes forestières moyennes	ONF	11.2%	17.0%	51.8%
plaquettes forestières moyennes	ONF	13.4%	15.0%	11.9%
plaquettes forestières moyennes	ONF	19.1%	25.0%	30.9%
plaquettes forestières moyennes	ONF	22.9%	33.0%	44.1%
plaquettes forestières moyennes	ONF	29.0%	42.0%	44.8%
plaquettes forestières moyennes	ONF	30.2%	44.0%	45.7%
plaquettes forestières moyennes	ONF	32.1%	52.0%	62.0%
plaquettes forestières moyennes	ONF	35.0%	51.0%	45.7%
plaquettes forestières moyennes	ONF	38.8%	46.0%	18.6%
plaquettes forestières moyennes	ONF	46.0%	>55%	19.6%
plaquettes forestières importantes	COFOLOR	29.7%	33.0%	11.1%
plaquettes forestières importantes	COFOLOR	30.5%	37.0%	21.3%
plaquettes forestières importantes	COFOLOR	31.3%	43.0%	37.4%
plaquettes forestières importantes	COFOLOR	33.2%	46.0%	38.6%
plaquettes forestières importantes	COFOLOR	33.7%	49.0%	45.4%
plaquettes scierie	Tonnerieux	25.0%	25.0%	0.0%
plaquettes scierie	Tonnerieux	26.1%	24.0%	-8.0%
plaquettes scierie	Tonnerieux	28.9%	29.0%	0.3%
plaquettes scierie	Tonnerieux	33.3%	34.0%	2.1%
déchets de palettes	Uzemain	19.5%	20.0%	2.6%
déchets de palettes	Uzemain	20.5%	20.0%	-2.4%
déchets de palettes	Uzemain	46.2%	53.0%	14.6%
déchets de palettes	Uzemain	57.3%	54.0%	-5.7%
sciure	Gaiffe	16.0%	12.0%	-25.0%
sciure	Gaiffe	27.4%	26.0%	-5.1%
sciure	Gaiffe	36.4%	36.0%	-1.1%
sciure	Gaiffe	44.0%	45.0%	2.3%
sciure	Gaiffe	47.0%	50.0%	6.4%
sciure	Gaiffe	48.7%	44.0%	-9.7%
sciure	Gaiffe	56.0%	53.0%	-5.4%
copeaux	Gaiffe	16.1%	1 à 6%	-81.4%
écorces résineux	Tonnerieux	43.0%	>55%	27.9%
écorces feuillus	Gaiffe	45.0%	>55%	22.2%
panneaux	CFP	11.8%	17.0%	44.1%

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

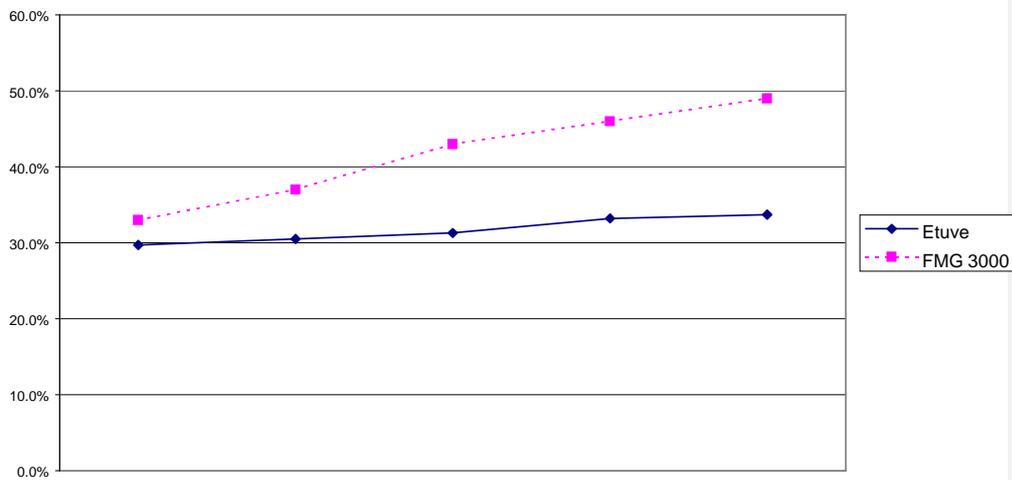
Ces résultats sont synthétisés dans les graphiques suivants :

Plaquettes forestières moyennes



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

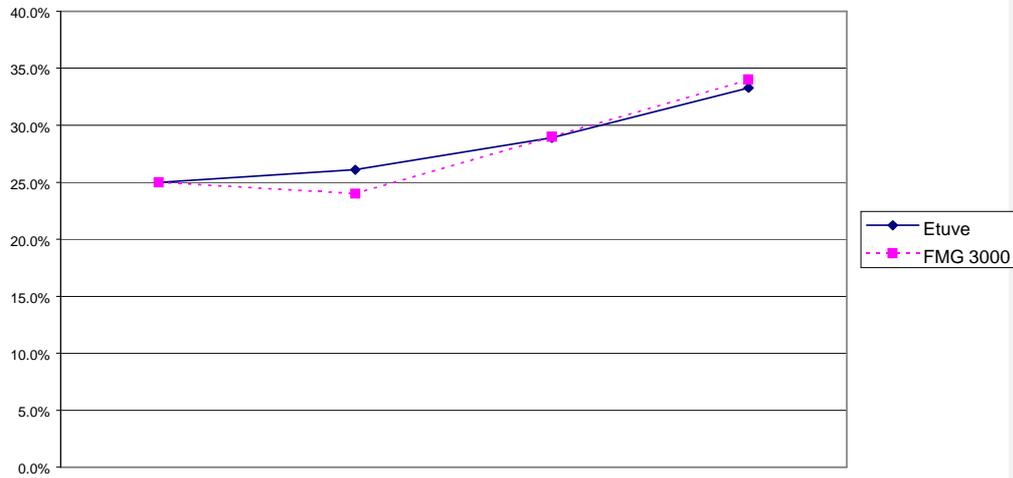
Plaquettes forestières importantes



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

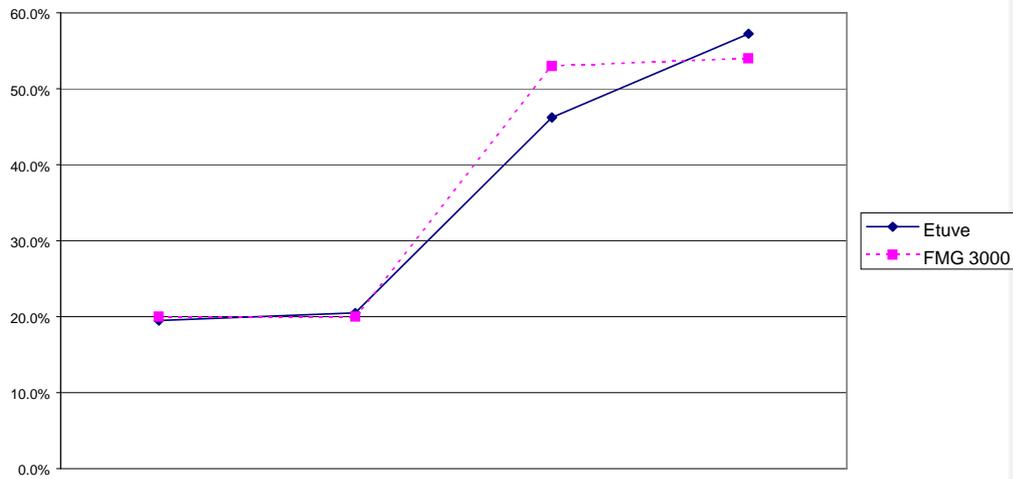
Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Plaquettes de scieries



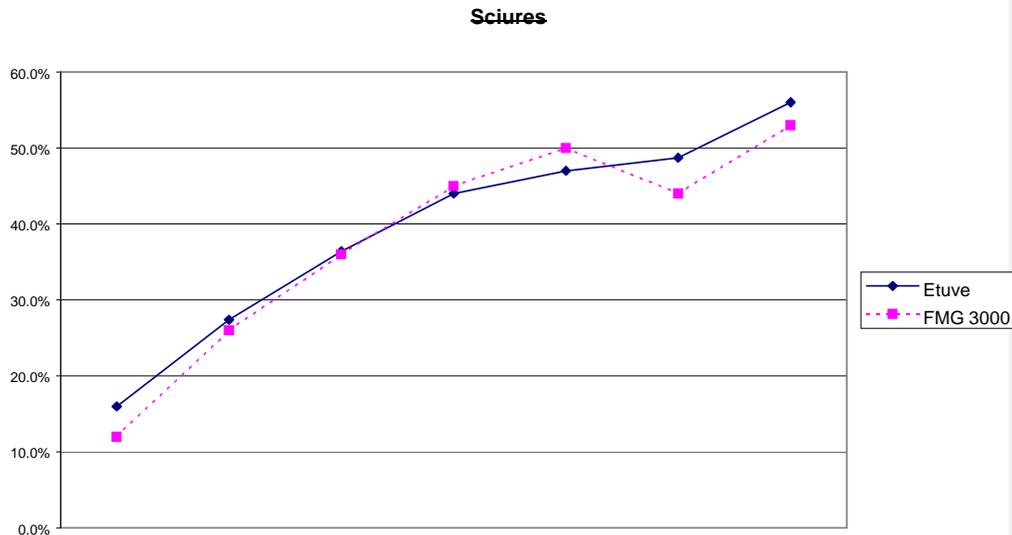
Les mesures sont très proches des mesures de référence.

Déchets de palettes



Les mesures sont très proches des mesures de référence.

Mesure des caractéristiques des combustibles bois



Les mesures sont très proches des mesures de référence.

Les mesures sont très bonnes pour les plaquettes forestières fines et mauvaises pour les copeaux et les écorces.

Comme pour le micro onde des essais complémentaires ont été effectués. En voici les résultats :

Echantillon : 1

Provenance de l'échantillon : Silo de la chaufferie communale de Bellgarde Poussieu (38)

Type de combustible : Plaquettes forestières moyennes
(granulométrie maximale : 50 mm/20mm/10mm)

Type de déchiqueteur : Biber 5

Essence du bois : châtaignier

Résultat FMG 3000 : 18 %

Résultat étuve : 17,5 %

Après humidification de l'échantillon :

Résultat FMG 3000 : 27 %

Résultat étuve : 27,5 %

Echantillon : 2

Provenance de l'échantillon : Hangar de stockage de la commune de Dionay (38)

Origine et destination du bois :

Type de combustible : Plaquettes forestières fines
(granulométrie maximale : 30 mm/15mm/05mm)

Type de déchiqueteur : Jean Pain (super pain 900)

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Essence du bois : châtaignier, chêne, robinier

Résultat FMG 3000 : > 55 %

Résultat étuve : 49.5 %

Après séchage de l'échantillon pour obtenir une valeur avec le FMG 3000 :

Résultat FMG 3000 : 50 %

Résultat étuve : 41.8 %

Echantillon : 3

Provenance de l'échantillon : Silo de la chaufferie de Monsieur Froment à Yseron (38)

Type de combustible : Plaquettes d'arboricultures fines

(granulométrie maximale : 30 mm/15mm/05mm)

Type de déchiqueteur : Jean Pain (super pain 900)

Essence du bois : noyer

Résultat FMG 3000 : 19 %

Résultat étuve : 16.2 %

Après humidification de l'échantillon :

Résultat FMG 3000 : 48 %

Résultat étuve : 41,4 %

Echantillon : 4

Provenance de l'échantillon : hangar de stockage de Monsieur Bontoux à Vassieux (26)

Type de combustible : Plaquettes Forestières moyennes

(granulométrie maximale : 50 mm/20mm/10mm)

Type de déchiqueteur : Biber 5

Essence du bois : Sapin Pectiné

Résultat FMG 3000 : 49 %

Résultat étuve : 45,5 %

Après séchage de l'échantillon pour obtenir une valeur avec le FMG 3000 :

Résultat FMG 3000 : 29 %

Résultat étuve : 29,5 %

Echantillon : 5

Provenance de l'échantillon : hangar de stockage au collège de la Chapelle en Vercors à (26)

Type de combustible : Plaquettes forestières

(granulométrie maximale : 100 mm/60mm/20mm)

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Type de déchiqueteur : Morbark model 26

Essence du bois : pin sylvestre, sapin pectiné, épicéa commun

Résultat FMG 3000 : > 55 %

Résultat étuve : 52.3 %

Après séchage de l'échantillon pour obtenir une valeur avec le FMG 3000 :

Résultat FMG 3000 : 25 %

Résultat étuve : 28.2 %

Analyse et conclusion

Les résultats sont très hétérogènes en fonction du type de combustibles :

- Il peut être très bon ou très mauvais pour les plaquettes.
- Il peut être très bon ou très mauvais pour les sciures et copeaux.
- Il ne peut donner des résultats fiables pour les écorces.

Le facteur essentiel des dérives de cet appareil est la granulométrie de l'échantillon, cet aspect est très flagrant sur les plaquettes forestières où les résultats sont diamétralement opposés au sein d'une même famille.

Ces résultats ne veulent pas dire que cet appareil donne des mesures fantaisistes. Au contraire, on a remarqué une très bonne reproductibilité des résultats (si on mesure plusieurs fois le même échantillon, on retrouve toujours la même mesure). De même, les écarts constatés sont relativement réguliers.

Cet appareil est étalonné pour un certain type de combustible (plaquettes de scierie et plaquettes forestières fines) pour lesquelles il donne des résultats fiables.

Pour utiliser d'autres types de combustibles, il faudrait ré-étalonner l'appareil.

L'étalonnage de l'appareil s'opère en réalisant des séries de mesure sur un combustible donné par la méthode de l'étuve (méthode de référence) et avec le FMG 3000.

Ces mesures permettent d'établir une courbe qui donne pour toute valeur de l'humidité l'écart entre la mesure donnée par le FMG 3000 et la mesure que donnerait la méthode de référence.

Cette courbe permet alors de corriger les valeurs lues sur le FMG 3000.

Evaluation des méthodes et appareils

Méthodes	Pesée et déshydratation			Permittivité diélectrique
	dans une étuve ventilée	dans un four micro-onde	par infrarouge	FMG 3000
Précision	<u>Référence</u> (méthode normalisée)	Faible (incertitude supérieure à 5 %)	<u>Forte</u> (différence inférieure à 1 %)	Variable suivant la granulométrie
Durée de la mesure	Longue (plus d'une journée)	Courte (10 à 20 minutes)	Variable (de 5 à 90 minutes)	<u>Résultat immédiat</u>
Plage de fonctionnement	Toute humidité	Toute humidité	Toute humidité	Humidité inférieure à 55 %
Comptabilité avec tous les types de combustibles	Oui	Oui	Oui	Etalonnage pour les faibles granulométries
Prix	Accessible (1 000 E)	Très accessible (200 E)	Prohibitif (5 500 E)	Abordable (2 000 E)
Mise en œuvre	Facile	Facile	En laboratoire	<u>Très Facile</u>
Adaptabilité au terrain	Non	Moyenne	Non	<u>Adéquate</u>
Méthode de référence	OUI	Non	Non	Non

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Ces appareils ne peuvent répondre complètement aux demandes de la filière bois énergie. Les principaux avantages et inconvénients de chacun sont présentés dans le tableau ci-dessous :

	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Micro-onde	Mesures rapides Toutes humidités	Faible précision Résultats variables
Appareil infrarouge	Très bonne précision Toutes humidités	Uniquement en laboratoire Mesures longues Echantillons très faibles Coût Ne fonctionne pas avec des écorces Ne fonctionne pas avec des écorces
Appareil diélectrique	Mesures sur site Mesures très rapides Echantillons importants	Très sensible à la granulométrie Nécessité d'étalonnage Ne fonctionne pas avec des écorces Limité à 55%

Autres recherches

Composition d'un combustible bois (granulométrie, écorces, impuretés)

Il n'existe pas de méthode rapide de détermination de la composition.

Les méthodes normalisées de détermination de la granulométrie sont dérivées de l'industrie papetière et des celles des panneaux à base de bois. Ces méthodes sont trop complexes par rapport au besoin réel du producteur de chaleur.

On recherchera donc à trouver des moyens simples permettant de mettre en évidence les paramètres suivants :

- Le pourcentage de **fibres longues** (dépassant la valeur nominale du cahier des charges). On vise à évaluer principalement le risque de blocage du dispositif d'alimentation et des critères de réglage des arrivées d'air.
- Le pourcentage de **fines** et leur **composition** (évaluation de la part de fines incombustibles par un test simple d'inflammation). Cette mesure permettra à l'utilisateur d'évaluer la conformité du combustible par rapport aux rejets de poussière via la cheminée et également le risque de fabrications de mâchefers et autres dépôts dans le foyer.

Repérage des fibres longues et fines

Dans le cadre des travaux sur la normalisation des bio-combustibles, des premiers éléments ont été fournis sur la caractérisation des combustibles. Des tolérances sur des catégories de granulométrie existent. Elles ont été définies pour divers types de combustibles dont la dénomination est super plaquettes, plaquettes, broyats, broyats mélangés, sciures et bois lourd.

Les méthodes par tamisage semblent suffisantes. Le principe français pour la houille demande à être adapté aux combustibles bois. L'application et la séparation effective des éléments bois suivant les dimensions requises restent difficile. Un tamis de maille x ne permet pas le criblage total des éléments de dimension x...

Evaluation du taux d'écorce et des impuretés.

L'écorce est un vecteur privilégié d'amenée de corps étrangers tel que les sables ou terres lors du débardage. Cette quantité anormalement élevée provoque la formation de mâchefers lors de la combustion. Il n'existe pas de méthodes rapides pour évaluer ce pourcentage.

Une première approche consiste à mesurer le taux de cendre, la présence d'éléments comme le sable faisant évaluer ce taux de façon importante. Cette méthode est trop onéreuse pour être envisagée.

Une autre méthode plus simple consiste à brûler les fines avec de l'alcool et à peser le résidu. Mais il est impossible d'obtenir une combustion complète de la matière organique et la majorité des corps étrangers se situe dans les éléments de grande dimension.

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

L'observation visuelle permet d'alerter l'utilisateur sur un taux d'écorce anormalement élevé. La présence d'éléments de couleur plus sombre que le bois de cœur et surtout d'une granulométrie généralement supérieure à celle des éléments tels que broyats de palettes ou plaquettes forestières sont des révélateurs dominants.

➤ Photographie n°1 : Plaquettes forestières avec un taux d'écorce d'environ 15%



On ne remarque pas d'éléments de granulométrie supérieure à 50 mm.

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Photographie n°2 : Plaquettes forestières avec un taux d'écorce d'environ 25%



On remarque des éléments d'une dizaine de centimètres de longueur de couleur plus foncée

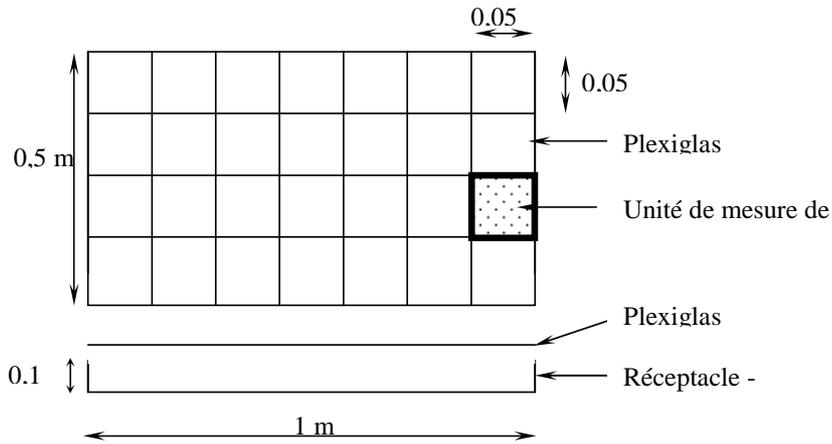
Photographie n°3 : Plaquettes forestières avec un taux d'écorce d'environ 50%

Le passage dans un tamis de 50 mm mettant en évidence plus de 5% d'éléments supérieurs à cette valeur permet également d'alerter l'utilisateur sur une présence anormalement élevée d'écorce.



Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Des mesures statistiques basées sur le dispositif suivant peuvent être adoptées :



L'échantillon est réparti uniformément dans le réceptacle. On pose le Plexiglas gradué en unité de surface de 25 cm². On compte le nombre d'unités comprenant majoritairement des matières vertes ou des écorces (= n). La teneur en matière verte est ainsi calculée :

$$TV = \frac{n}{200} \times 100$$

Perspectives

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Le travail réalisé permet d'amener quelques réflexions sur des travaux complémentaires ou des outils nouveaux à mettre en place :

1 – Mesure de l'humidité et du PCI :

Pour déterminer le PCI sans utiliser la méthode de référence, la méthode du micro-onde est la méthode la plus intéressante.

Elle possède tout de même quelques contraintes liées à un protocole de mesures relativement long et délicat :

- Pesée initiale
- Séchage au micro-onde par cycles de deux à 4 minutes avec pesée (de 2 à 10 cycles)
- Pesée finale
- Calcul de l'humidité de l'échantillon
- Détermination du PCI par un abaque

Ce protocole risque de rebuter certains maître d'ouvrages ou fournisseurs, il reste néanmoins accessible à n'importe qui.

Un instrument de mesures qui automatiserait les pesées et les calculs afin d'avoir un « PCI-mètre » à affichage direct serait à développer (l'opérateur place son échantillon dans l'appareil et les résultats s'affiche automatiquement quelques minutes plus tard).

2 – Engagement des fournisseurs : référentiel qualité

Qualifier les combustibles bois déchiqueté est aujourd'hui devenue une nécessité dans la mise en oeuvre d'une structure d'approvisionnement bois et de sa logistique. Malheureusement, on constate un manque crucial de méthode pour définir la démarche et notamment d'un référentiel technique sur la qualité des produits et des services associés à la fourniture de combustible bois déchiqueté

Pour y remédier, une démarche d'assurance qualité peut être mise en place entre le fournisseur de bois et son client. Dès lors, la qualité et les services des fournisseurs seront soumis à une évaluation en vue de la délivrance d'un certificat « qualité de service ».

Cette certification peut être délivrée par l'Association Française pour l'Assurance Qualité (AFAQ), premier organisme certificateur en France.

A titre d'exemple, le référentiel élaboré par FIBOIS 07/26 « Service Confiance® », est présenté ci-dessous. Il intègre sept engagements de service :

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">1. Confirmer le choix du combustible qui respecte le couple « chaudière/combustible »2. Définir avec le client la solution d'approvisionnement adaptée à votre consommation3. Etablir avec le client un contrat complet et précis4. Fournir au client un combustible aux caractéristiques constantes5. Lui assurer la continuité de votre approvisionnement6. Lors des livraisons, respecter la propreté du site et les horaires fixés avec le client7. Tenir compte du niveau de satisfaction du client |
|--|

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

Le référentiel prévoit ainsi (engagement 4) le contrôle des caractéristiques du combustible (humidité et granulométrie); les fournisseurs engagés devront donc effectuer ou faire effectuer des mesures sur leurs produits, selon bien entendu les méthodes indiquées dans le document.

Par conséquent, le respect de ces engagements va permettre une application justifiée et efficace des méthodes de contrôle et de mesures.

En effet, un contrôle réalisé chez un fournisseur signataire a un rôle plutôt préventif. Il fait suite à une demande du client souhaitant vérifier la qualité de son combustible et lui permet également de vérifier ses engagements vis à vis du client.

En cas de non-respect de la qualité du combustible livré, le contrôle est alors le plus souvent le principal point d'achoppement avec notamment la pratique des mesures. A ce niveau, le contrôle prend une dimension répressive pour le fournisseur de combustible et des pénalités peuvent alors lui être demandées si le contrat d'approvisionnement en fait mention.

Ce référentiel permet aussi d'établir un début de traçabilité et donc de mieux connaître le combustible utilisé (origine, caractéristiques, ...). Puisque que le fournisseur s'engage à tous les niveaux de l'approvisionnement.

Ces éléments peuvent donc permettre de différencier un combustible issu de « bois forestier » de celui obtenu par mélange de plaquettes forestières et de celles scieries.

Annexes

Nomenclature des combustibles

<i>Désignation</i>	<i>Classe</i>	<i>Granulométrie moyenne (en mm)</i>	<i>Tolérance de granulométrie E (En masse)</i>	<i>Teneur en fines (< 3 mm)</i>	<i>Teneur en écorce</i>	<i>Teneur en matières vertes</i>
Super plaquettes	SP	30 x 20 x 10	80 à 100 mm: moins de 25 % 100 à 130 mm: moins de 5 % Plus de 130 mm: 0 %	Inférieure à 3 %	<i>Pas d'ajout</i>	Moins de 5 %
Plaquettes	P	60 x 40 x 20	120 à 160 mm moins de 25 % 160 à 220 mm moins de 5 % Plus de 220 mm 0 %	Inférieure à 3 %	Suivant cahier des charges du constructeur	Moins de 5 %
Broyats	B	150 x 50 x 50	250 à 350 mm: moins de 10 % Plus de 350 mm: 0 %	Inférieure à 3 %	Suivant cahier des charges du constructeur	Moins de 5 %
Broyats mélangés	BM	150 x 50 x 50	250 à 350 mm: moins de 10 % Plus de 350 mm: 0 %	-	Suivant cahier des charges du constructeur	-
Sciures	S	2 x 1 x 1	2 à 4 mm: moins de 25 % 4 à 8 mm: moins de 5 % Plus de 8 mm: 0 %	-	<i>Pas d'ajout</i>	0 %
Bois lourd	BL	200 x 100 x 20	Plus de 750 mm: 0 %	-	Suivant cahier des charges du constructeur	-

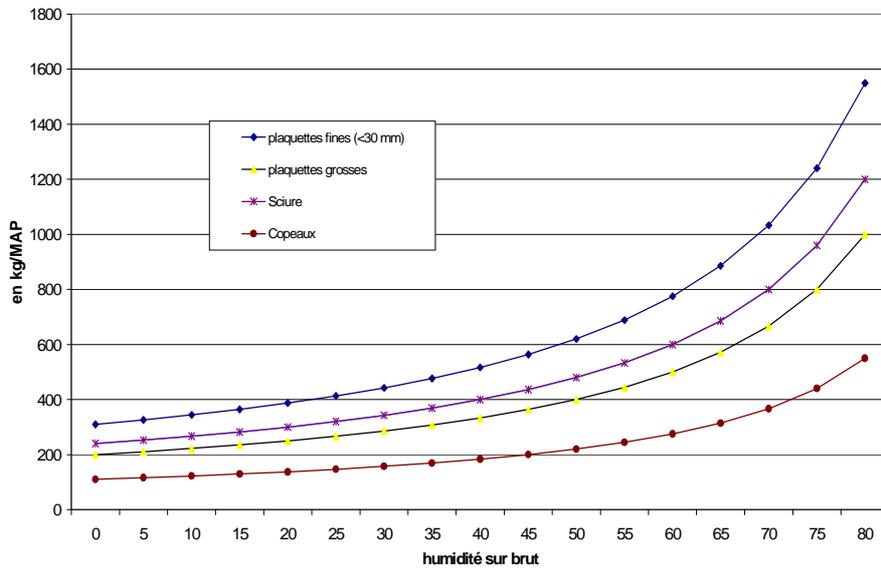
Chaque classe de combustible est déclinée suivant son humidité. Un nombre est adjoint à la classe du combustible donnant son taux d'humidité sur brut en pourcent. Ainsi: B30 désigne un broyat à 30 % d'humidité sur brut.

La ou les lettres décrivent donc les propriétés de forme et de composition du bois, et le nombre décrit l'humidité du combustible et par suite son pouvoir calorifique. On pourra travailler en mélange de qualité (exemple ½ SP30 + ½ S30).

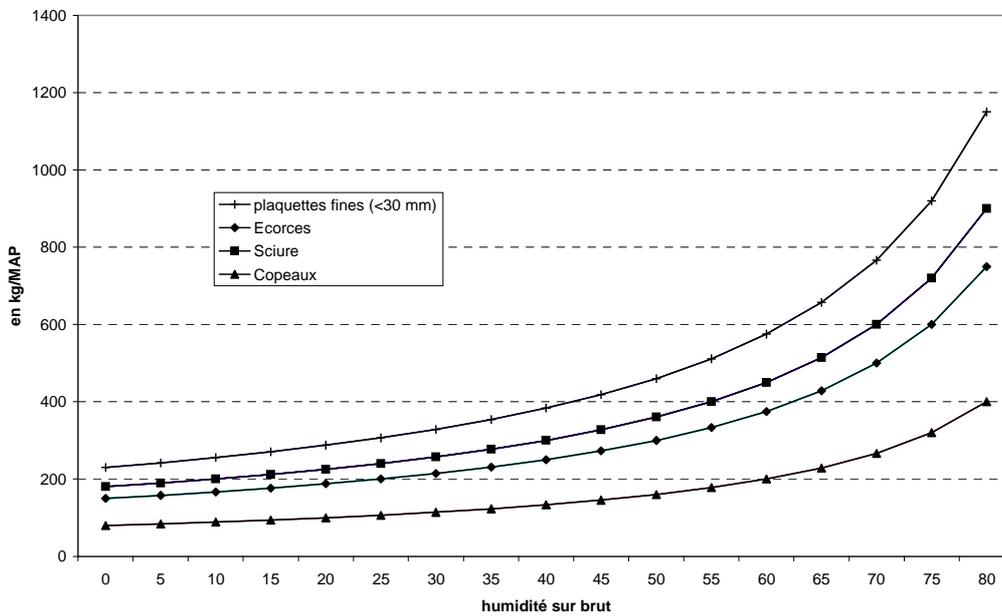
L'exigence de base, avant même de définir le combustible, est de fournir un combustible aux caractéristiques constantes dans le temps

Abaques de conversion masse volumique

Masse volumique feuillus en kg/MAP



Masse volumique des résineux en kg/MAP



Contrat d'approvisionnement

Article 1 : OBJET DU MARCHE

Le présent marché a pour objet l'attribution d'un contrat d'approvisionnement en combustible bois propre pour la chaufferie de

Le combustible de base adapté à la chaufferie sera constitué de bois propre provenant de

L'objet du contrat est de faire assurer la fourniture de combustible adapté, pour alimenter la chaufferie bois réalisée par la commune de et située sur le territoire de cette commune.

Ce contrat précise la nature de la fourniture, les conditions techniques et économiques de livraison, et les engagements mutuels du fournisseur et de l'exploitant.

Le présent CCTP constituera le futur contrat d'approvisionnement entre XXX et le fournisseur retenu.

Article 2 : TYPE DE CONSULTATION

La consultation est réalisée dans le cadre de la procédure d'appel d'offres ouvert

Article 3 : DEFINITION DES SIGNATAIRES DU CONTRAT

Le gestionnaire de la Chaufferie est qui sera désignée dans le contrat sous le terme : XXX.

Le titulaire du présent marché sera désigné sous le terme : le fournisseur

Article 4 : DUREE ET CONTENU DU CONTRAT

Le présent contrat porte sur l'engagement du fournisseur à fournir du combustible bois dans les conditions définies aux articles 5 à 6 du présent CCTP, pour une durée de années à compter de la date de signature du contrat. Les premières fournitures sont en

Le contrat comprend les conditions techniques de fourniture ainsi que le Prix proposé par le fournisseur tel que défini à l'article 7.

Article 5 : DEFINITION DES CONDITIONS DE LA FOURNITURE DU COMBUSTIBLE

5.1. Nature du combustible

La chaufferie du Maître d'Ouvrage a été réalisée pour recevoir exclusivement du bois propre et ne pourra recevoir de déchets. Elle ne constituera en aucun cas un lieu d'incinération de déchets. Le fournisseur devra donc fournir exclusivement du bois propre constitué de sous-produits d'industries de la transformation du bois (écorces, sciure, chutes). Il ne sera pas accepté de déchets bois tels que des panneaux de particules, palettes, caissoneries usagées....

5.2. Caractéristiques du combustible

- Bois propre exclusivement
- Exempt de tout corps étranger : ferrailles, pierres ou terre, déchets, plastique...
- Humidité relative (poids eau / poids brut) de référence : % : le combustible sera compté pour cette valeur moyenne et il sera refusé pour une humidité relative supérieure à %.
- Pouvoir calorifique moyen de kWh/tonne
- Granulométrie :
 - dimensions moyennes : mm
 - dimension maximale < mm : on admettra exceptionnellement des morceaux de cette taille

La mesure et le contrôle des caractéristiques du combustible sont précisés à l'article 6.

Tout dégât ou problème liés au non respect des caractéristiques du combustible entraînera une procédure contentieuse pouvant conduire à une résiliation du contrat, dans le cas où le combustible est jugé non conforme, comme prévu à l'article 8

5.3. Quantités

Les quantités seront définies en tonnes en considérant une humidité relative maximale de %. Afin d'aider le fournisseur à évaluer le marché le maître d'ouvrage précise que le besoin annuel en combustible est évalué à tonnes de bois dans les conditions précisées auparavant.

Cependant l'engagement contractuel entre le fournisseur et le Maître d'Ouvrage **se limite à une valeur minimale de tonnes et sera au maximum de tonnes**, ceci pouvant être lié aux aléas climatiques ou aux variations des besoins des différents abonnés du réseau.

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

La répartition prévisionnelle, sur l'année, des consommations de bois n'est pas contractuelle ; elle est donnée à titre indicatif :

Mois	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Quantité en tonnes												

Le fournisseur s'engage à garantir au Maître d'Ouvrage la sécurité des approvisionnements.

5.4. Livraison

Le fournisseur aura à sa charge la livraison du combustible sur le site de la chaufferie.

Les livraisons devront s'effectuer au plus tard **dans les heures après chaque commande**, lors des jours ouvrés après accord du gestionnaire de la chaufferie.

Le Maître d'Ouvrage et le fournisseur s'entendront pour les dates exactes des livraisons dans le cadre des quantités et du calendrier indicatif prévisionnels.

Le fournisseur devra être capable de faire face à toute commande d'un maximum tonnes de bois dans les deux jours, hors journées de week-end ou fériées. Il devra donc toujours avoir à disposition cette quantité minimale.

Les livraisons s'effectueront par camions de type , pour des raisons techniques. Pour tout autre type de livraison, il devra être obtenu au préalable, l'accord de XXX.

Une livraison ne pourra être réalisée sans l'accord préalable et sans la présence du représentant de la chaufferie.

Le fournisseur devra avec le gestionnaire de la chaufferie, réaliser annuellement et si nécessaire, deux fois par an, une réunion de concertation sur l'organisation de la livraison du combustible à la chaufferie.

A titre indicatif le fournisseur précisera les moyens qu'il met à disposition pour assurer les livraisons et respecter les objectifs précédents

- Aire de stockage :	sous abri	extérieur	surface :m ²
	bétonnée ou goudronnée		
- matériels (véhicules):		
		
-	précisions	éventuelles	sur l'organisation / remarques :
		
		

Article 6 : DEROULEMENT, MESURE ET CONTROLE DES LIVRAISONS

6-1. Bons de livraison et registre d'approvisionnement

Le fournisseur devra fournir à chaque livraison un bon de livraison comprenant :

- le bon de pesée
- le volume : les camions seront remplis et il ne sera tolérée qu'une perte de volume de 5 % acceptable liée au tassement.
- la provenance du combustible (entreprise et lieu)

Par ailleurs, un registre d'approvisionnement sera tenu. Il comprendra les bon de livraison, les caractéristiques du combustible éventuellement mesurées de toutes les livraison.

6-2. Règles pour la quantification du combustible

La livraison sera comptée en tonnes mais avec une limite de densité de kg/m³. Si la densité est supérieure la livraison ne sera comptée en référence au volume que pour cette densité maximale. Ainsi un camion de 80 m³ ne sera compté au maximum que pour xx tonnes, un camion de 30 m³ pour yy tonnes afin de garantir à la XXX l'humidité moyenne du combustible.

6-3. Contrôles

- L'humidité sera évaluée selon le rapport poids/volume et si la règle est de ne compter le tonnage qu'en rapport à une humidité maximale de %, la livraison pourra malgré tout être acceptée jusqu'à une densité maximale de kg/m³, soit jusqu'à tonnes pour un 80 m³ et tonnes pour un 30 m³.
- Le représentant de XXX évaluera le volume livré et la qualité du combustible.

Si les conditions de quantité et qualité ne sont pas respectées XXX refusera le déchargement. Toutefois, cette vérification visuelle étant obligatoirement partielle elle ne garantit pas au fournisseur les pénalités liées au non respect du contrat (pierres, terre, corps étrangers...) (voir article 8)

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

- Il sera réalisé périodiquement par le gestionnaire de XXX, un contrôle du taux d'humidité (par sondage d'échantillon) sur poids brut du combustible. En cas de désaccord, le fournisseur pourra à sa charge, réaliser un contrôle du taux d'humidité en présence du gestionnaire de la chaufferie.

Il n'est accepté par XXX qu'un combustible dans une fourchette allant de à % de taux d'humidité sur masse brute.

- XXX pourra également réaliser périodiquement des contrôles de PCI par des mesures confiées à un organisme agréé.

- XXX se réserve le droit de contrôler les conditions de stockage du combustible et leur compatibilité avec les engagements pris.

Suite à toute distorsion avec les engagements du contrat (humidité, PCI, conditions de stockage, caractéristiques du combustible....) répétée et dûment notifiée au fournisseur, il pourra être proposé une résiliation du contrat de fourniture de combustible.

Article 7 : REMUNERATION DU COMBUSTIBLE AU FOURNISSEUR

7.1. Règles pour la rémunération du combustible

- La rémunération du combustible au fournisseur est basée sur un Prix à la tonne avec un combustible dont le taux d'humidité moyen sur brut est de % maximum pour un pouvoir calorifique de kWh/tonne.

- Le prix à la tonne proposé par le fournisseur est un prix hors taxes en Francs ou Euro/tonne.

- Ce prix est donné pour un combustible livré à la chaufferie.

7.2. Prix du combustible proposé

Le gestionnaire de la chaufferie procurera chaque mois au fournisseur un état des tonnages livrés et à titre indicatif, du taux d'humidité moyen du combustible livré à la chaufferie.

Le fournisseur élaborera à partir de ces données la facture mensuelle du combustible livré à la chaufferie.

Le prix proposé par le fournisseur sera un prix annuel ferme sur la durée du contrat et pour la quantité prévue au contrat.

Pour le combustible de référence avec une humidité maximale de % d'humidité sur poids brut et pour un PCI de kWh/tonne :
--

Le prix de référence est $P_0 = (\text{Valeur :}) (\text{Monnaie}) \text{ H.T. / tonne}$
--

Le prix (P_0) sera indexé sur la durée du contrat avec une révision annuelle à la date anniversaire du contrat suivant la formule

$P = P_0^* \text{}$

Les indices sont publiés au Moniteur des Travaux Publics (indice sciage, indice transport routier...)

Article 8 : MANQUEMENT AUX TERMES DU CONTRAT

- Le fournisseur devra être en mesure d'approvisionner la quantité totale de combustible prévue selon l'article 5. En cas où le fournisseur dénonce de manière anticipée le contrat, il pourra être perçue par XXX une indemnité correspondant à

- Toute livraison non conforme ne sera pas rémunérée

- En cas de manquement de la part du fournisseur, qui entraînerait un fonctionnement avec une autre énergie que le bois (absence de livraison dans les heures ou blocage lié à une livraison non conforme) il pourra être demandé par XXX une indemnité au fournisseur d'un montant correspondant au coût de l'énergie de substitution qu'il a fallu consommer, selon les besoins du moment.

- Si le combustible n'est pas conforme et comporte trop de matériau non conforme (pierre, ferraille) la vidange du silo sera à charge du fournisseur.

Article 9 : ENGAGEMENT DU FOURNISSEUR ET DE XXX

Le fournisseur s'engage à respecter l'ensemble des points détaillés dans le cadre de ce cahier des charges faisant office de contrat futur.

Le Maître d'ouvrage s'engage à respecter l'ensemble des termes de ce cahier des charges faisant office de contrat futur.

Pour le fournisseur,

Pour le Maître d'Ouvrage
Le Directeur de XXX

Bibliographie

- ✓ Priorities for methods of sampling and testing in the context of preparing European standards for solid biofuels
Green Land – 2000
- ✓ A review and critical assessment of ten reports relevant to standards for solid biofuels
Green Land – 1999
- ✓ Wood fuels standards
ETSU – 1993
- ✓ Quality assurance manual for solid wood fuels in Finland
VTT Energy – 1998
- ✓ Swedish standards on biofuels
SIS –
- ✓ Standardisation for biofuels in Germany
Center of Agricultural Engineering – 1999
- ✓ Best practise list for biomass fuel and ash analysis in the Netherlands
NOVEM – 1998
- ✓ 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 granulométrique par tamisage
Norme NF B 51-004 Bois Détermination de l'humidité
- ✓ Norme NF M03-003 : Détermination du taux de cendre
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
- ✓ CEN/TC 335/WG4 N9 Solid biofuels Method for détermination of moisture content.
AFNOR – 1990
Norme SS 18 71 74 Biofuels and peats : Détermination 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
- ✓ Combustibles bois-énergie
Techniques de l'ingénieur
- ✓ Unité et mesure des combustibles bois
Fibois

Mesure des caractéristiques des combustibles bois

- ✓ Transformations thermochimiques du bois ; Pyrolyse et combustion
Cours ENSTIB
- ✓ La combustion du bois
Cours ENSTIB
- ✓ Calorimetry, the cone calorimeter
Fire protection engineering - 1995
- ✓ Méthodes internes Critt bois
- ✓ 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
- ✓ Mesure de l'humidité des solides dans l'industrie
Guide ADEME
- ✓ Bois Holz Energie, le marché du poêle à granulé aux USA
Revue technique européenne (septembre 1999)