

# TECHNIQUES ET MATÉRIELS DE CARBONISATION

## Contrôle de performances

Philippe GIRARD  
Ingénieur de recherche au C.T.F.T.



Fours de carbonisation maçonnés au Brésil

*Brick kilns in Brazil*

## RÉSUMÉ

### **TECHNIQUES ET MATÉRIELS DE CARBONISATION** **Contrôle de performances**

La parfaite maîtrise des performances des matériels et techniques de carbonisation revêt toute son importance lors de l'élaboration de compte d'exploitation prévisionnel d'une entreprise ou pour la comparaison de matériels entre eux.

Le C.T.F.T., en fonction de son expérience, propose ici cinq ratios qui peuvent être utilisés à cet effet. Les modes opératoires sont précisés afin de disposer de base commune de comparaison.

## ABSTRACT

### **CHARRING TECHNIQUES AND EQUIPMENT** **Performance control**

The full importance of a thorough control of techniques and equipment for the production of charcoal is revealed when it comes to preparing the estimated trading account or comparing different items of equipment.

In the light of its experience, the C.T.F.T. proposes five ratios which can be used for this purpose. The procedures are explained so as to establish a common basis of comparison.

## RESUMEN

### **TECNICAS Y EQUIPOS DE CARBONIZACION** **Control de prestaciones**

El perfecto dominio de las prestaciones de los equipos y técnicas de carbonización toma toda su importancia cuando se trata de establecer la cuenta de explotación previsual de una empresa o bien, para la comparación entre sí de las características de los equipos que se desea utilizar.

Acorde a su propia experiencia, el C.T.F.T. propone aquí cinco ratios que se pueden aplicar para tal finalidad. También se precisan los métodos operatorios, con objeto de disponer de una base común de comparación.

**D**ans le monde, la production de charbon de bois a de tout temps été assurée par l'intermédiaire de technologies extrêmement diverses, plus ou moins bien adaptées aux conditions de milieu dans lesquelles elles sont mises en œuvre.

Ces dernières années, la raréfaction du bois ou l'augmentation de son prix, l'augmentation du coût de la main-d'œuvre ou la possible mécanisation des manutentions et, d'une manière plus générale, la volonté internationale d'optimiser la productivité des matériels, ont suscité l'émergence de nouvelles technologies de carbonisation ainsi que des modifications parfois importantes sur les technologies existantes.

Il apparaît donc nécessaire de disposer de bases communes qui permettent de comparer objectivement :

- les résultats obtenus sur un même matériel,
- les technologies et les matériels entre eux,
- les résultats obtenus dans des régions et des pays différents.

Les performances de production sont, en effet, extrêmement variables en fonction de nombreux paramètres sur lesquels le carbonisateur dispose souvent d'une

grande liberté d'action : séchage préalable du bois, formation professionnelle...

La disponibilité et la maîtrise de ratios clairement définis sont indispensables à une évaluation comparative des matériels, notamment à l'élaboration de toute étude technico-économique, et préalables à tout engagement dans un projet privé ou public. En effet, des ratios mal adaptés peuvent avoir des répercussions économiques et financières très lourdes pour le promoteur. A titre d'exemple, si le rendement massique prévisionnel retenu pour un matériel est de 30 % sur anhydre alors que l'entreprise doit carboniser du bois vert, il est probable que le rendement chutera dans de très fortes proportions pour tomber en dessous de 20 %. Le projet va enregistrer une perte d'exploitation réhibitoire pour son maintien.

De son expérience, le C.T.F.T. a retenu 5 ratios :

- Rendement massique.
- Rendement massique pondéré.
- Rendement commercial.
- Rendement énergétique.
- Rendement technologique.

Nous proposons ici un mode opératoire simple permettant de les contrôler et de les comparer.

## RENDEMENT MASSIQUE

### OBJET

Le rendement massique permet d'estimer la production en charbon d'un matériel en fonction de la masse du produit à carboniser traitée. Il est défini comme la masse de charbon anhydre produit rapporté à la masse de bois anhydre carbonisé.

La notion de rendement massique sur bois anhydre est à préférer à toute autre estimation de rendement pondéral et a fortiori à toute notion de rendement volumétrique. En effet :

- Le taux d'humidité d'un bois est susceptible de grandes variations en fonction des essences considérées, des dates d'abattage des bois, des conditions climatiques... La masse humide des billons ne permet pas d'apprécier, seule, la quantité de matière ligneuse effectivement carbonisable.

- L'estimation volumétrique d'un tas de bois ou de charbon, très pratique pour le négoce, n'intègre pas la notion de foisonnement et ne traduit donc que très imparfaitement la masse de bois ou de charbon correspondant, qui peut varier dans d'assez fortes proportions en fonction de la taille des morceaux (longueur, section des bois), de la rectitude des billons (qualité du rangement), etc.

Seule la notion de rendement sur bois anhydre permet de comparer sûrement des résultats entre eux.

### MODE OPÉRATOIRE

La détermination de ce ratio nécessite les opérations suivantes :

#### Avant carbonisation

- . Pesée de la totalité du bois enfourné (PH).
- . Détermination de l'humidité sur brut du bois (H %) (définie p. 59, Annexe 1).
- . Détermination de la masse anhydre de bois (PO) : par calcul, à partir de la masse totale initiale (PH), selon la formule :

$$PO = PH \left( 1 - \frac{H\%}{100} \right) \quad \textcircled{1}$$

#### Après carbonisation

- . Tri et pesée des incuits éventuels (I).
- . Pesée immédiate de la totalité du charbon (PC).

### EXPRESSION DES RÉSULTATS

Le rendement massique sur anhydre (R) exprimé en pourcentage est donné par la formule :

$$R = \frac{PC}{PO - I} \times 100 \quad \textcircled{2}$$

## Remarques

● L'assimilation des incuits à du bois anhydre non carbonisé nous semble le choix le plus raisonnable, même s'il ne traduit pas réellement la production d'un cycle eu égard à la quantité de bois introduite dans le four. L'obtention d'un volume important d'incuits biaise très fortement le résultat qui devra être écarté. De même, une technologie produisant systématiquement une quantité importante d'incuits devra être à reconsidérer.

● Lorsque la mise en œuvre d'une technologie nécessite le recours à un combustible d'appoint pour le démarrage ou pour toute la durée du cycle, il convient de comptabiliser cette énergie au niveau des rendements de transformation.

Si ce combustible est du bois, la quantité de bois anhydre (BO) introduite dans le système doit être appréciée de la même façon que précédemment. La formule du rendement massique devient alors :

$$R_{net} = \frac{PC}{PO - I + BO} \times 100 \quad \text{② bis}$$

Si ce combustible n'est pas du bois, la quantité d'énergie fournie peut aussi être prise en compte, la formule ③ permet d'en calculer l'équivalent bois anhydre pour appliquer la formule :

$$BO = \frac{\text{Masse anhydre combustible} \times \text{PCI anhydre combustible}}{\text{PCI anhydre bois carbonisé}} \quad \text{③}$$

Ce calcul impose la mesure en bombe calorimétrique du P.C.S. du bois et, éventuellement, des combustibles s'il ne s'agit pas de combustible classique (gaz naturel, fuel ...). A défaut d'équipement adéquat, le P.C.I. du bois peut être approché à partir du tableau p. 60, Annexe 2.

## Commentaires

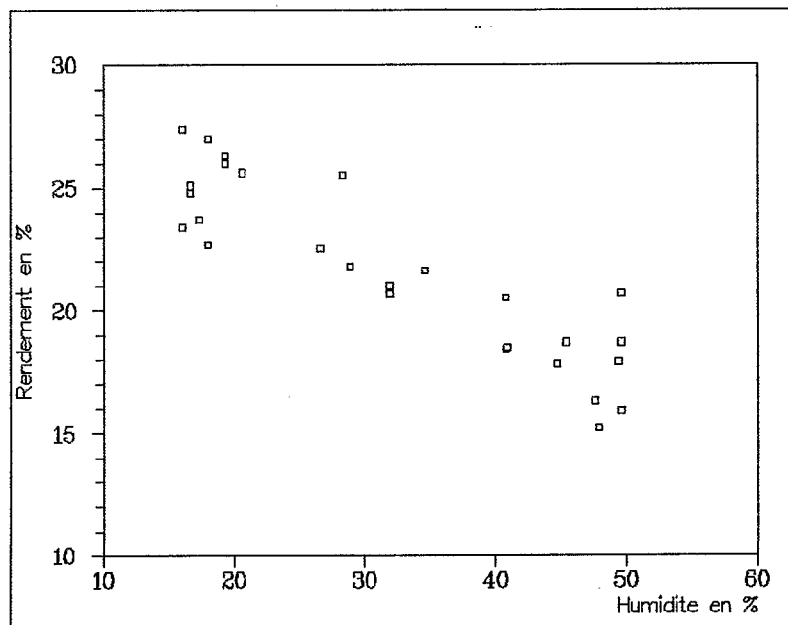
● Le rendement massique est fonction de nombreux paramètres parmi lesquels l'humidité initiale du bois a une influence prépondérante, comme le fait apparaître le graphe ci-dessous obtenu à partir de carbonisations de bois d'*Eucalyptus tereticornis* du Togo, en four métallique cylindrique de 4 m<sup>3</sup>, de type Magnien. Ce graphe, représentant l'évolution des rendements de carbonisation en fonction de l'humidité sur brut du bois, a été obtenu à partir de 32 carbonisations.

● En revanche, si les technologies de carbonisation à combustion partielle sont bien maîtrisées, elles aboutissent à des rendements massiques voisins, comme le montre le tableau page 57, obtenus à partir de carbonisation de bois d'*Eucalyptus tereticornis* du Togo.

● La composition chimique d'un charbon de bois est fonction de son degré de cuisson, c'est-à-dire du niveau de température atteint lors de la réaction finale. La qualité augmente avec la température au détriment du rendement massique. Il convient donc de toujours préciser les caractéristiques physico-chimiques d'un charbon à l'annonce de tout rendement massique de carbonisation. Les valeurs à préciser concernent :

### — Les caractéristiques chimiques

- indice de matières volatiles, MV, exprimé en pourcentage du produit anhydre,
- teneur en cendres, C, exprimée en pourcentage du produit anhydre,
- taux de carbone fixe, CF, exprimé en pourcentage du produit anhydre.



Rendement en fonction de l'humidité.

*Effect of raw material moisture content on pyrolysis yields.*

— Les caractéristiques physiques les plus intéressantes

- . densité anhydre du produit,
- . indice de friabilité,
- . humidité sur brut.

**RENDEMENTS MASSIQUES  
obtenus à partir des bois de carbonisation  
d'*Eucalyptus tereticornis***

Type de carbonisation	Résultats de carbonisation		Caractéristiques des charbons			
	Taux d'humidité (%)	Rendement massique (%)	Carbone fixe (%)	P.C.S. (kJ/kg)	Cendres (%)	M.V. (%)
Four métallique Magnien 4 m <sup>3</sup> . Résultats moyens	28,5	24,7	78,7	31 830	3,6	17,7
Meule traditionnelle Résultats moyens	28,4	26	79,5	32 200	2,7	17,8
Meule casamançaise Résultats moyens	29,0	25,3	77,6	31 000	3,3	19,1

## RENDEMENT COMMERCIAL

### OBJET

Les différentes manipulations du charbon et sa grande friabilité entraînent des pertes sous forme de poussières, les  *fines* , et de brisures, les  *braisettes* , souvent difficilement commercialisables.

La répartition granulométrique ci-après peut être adoptée mais toute autre répartition peut être retenue en fonction des contraintes imposées par le marché :

- . fines = 0 à 8 mm
- . braisettes = 8 à 20 mm
- . charbon commercial > 20 mm.

Les pertes sont fonction de différents paramètres dont le savoir-faire des carbonisateurs, la technologie utilisée, la nature du conditionnement retenu, la friabilité du charbon... Elles peuvent représenter un volume important de la production qu'il convient d'apprécier.

Il est ainsi intéressant de définir un ratio : le rendement commercial Rc.

### MODE OPÉRATOIRE

- Cribler le charbon immédiatement après défournement pour séparer la fraction commercialisable des charbons impropres à la vente.
- Peser immédiatement le refus (CR).

### EXPRESSION DES RÉSULTATS

Le rendement commercial (Rc) exprimé en pourcentage est donné par la formule :

$$Rc = \frac{\text{masse de charbon commercialisable produit}}{\text{masse de bois anhydre carbonisé}}$$

$$Rc = \frac{PC - CR}{PO} \quad (4)$$

### COMMENTAIRES

Le rendement commercial varie dans d'assez fortes proportions en fonction des pertes qui peuvent représenter de 5 à 40 % de la masse de charbon initiale.

## RENDEMENT MASSIQUE PONDÉRÉ

### OBJET

Sur les systèmes discontinus qui représentent la majorité des technologies de carbonisation, les caractéristiques physico-chimiques d'un charbon varient d'une carbonisation à l'autre en fonction de nombreux facteurs.

La comparaison directe de deux résultats de rendement massique, sans prendre en considération la qualité du

charbon, peut introduire un biais important dans leur interprétation.

Afin de pouvoir comparer deux essais entre eux et plusieurs technologies entre elles, il nous est apparu intéressant de ramener par le calcul tous les charbons à un même taux de carbone fixe sur anhydre de 80 % et définir ainsi le rendement massique pondéré R80.

## MODE OPÉRATOIRE

- Déterminer le rendement massique (cf. Rendement massique, p. 55) ;
- Mesurer l'indice de matières volatiles, MV, exprimé en pourcentage du produit anhydre.
- Mesurer la teneur en cendres, C, exprimée en pourcentage du produit anhydre.
- Calculer le taux de carbone fixe, CF, selon la formule :  
$$CF = 100 - (MV + C).$$

Les modes opératoires (1) pour la réalisation de ces mesures sont donnés par les principales normes suivantes :

AFNOR	: NF B 55-101.
ASTM	: D 1762-64-77.
ISBN	: 0.7262. 3396 x/0.7262.2950.4. 0.7262. 1790.5/0.7262.1625.9.
ISO	: 1171 (83)/602 (83). 331 (83)/562.
BSI	: BS.1016.3 (73).

## EXPRESSION DES RÉSULTATS

Le rendement massique pondéré (R80) exprimé en pourcentage est donné par la formule :

$$R80 = R_x \times \frac{CF_x}{80} \times 100 \quad \text{⑤}$$

# RENDEMENT TECHNOLOGIQUE

## OBJET

En fonction de la nature de l'approvisionnement, de la forme géométrique du four, du mode de conditionnement et du rangement du bois, le coefficient de remplissage d'un four, qui est le rapport du volume de bois introduit sur le volume total du four, est très variable.

Ainsi, selon la situation de l'entreprise, la disponibilité en main-d'œuvre, la nature de l'approvisionnement, etc., la quantité de bois carbonisé par cycle peut varier dans de très fortes proportions (de 135 à 360 kg de bois anhydre/m<sup>3</sup> four, cf. p. 62, Annexe 3) et, à rendement massique équivalent, la quantité de charbon obtenue par cuisson sera extrêmement variable.

On peut définir un rendement technologique (Rt) qui permet d'exprimer la quantité de charbon escomptable par cycle en fonction du volume du four.

(1) Il convient de préciser la norme utilisée pour l'élaboration des caractéristiques chimiques des charbons car les modes opératoires sont parfois assez différents d'une norme à l'autre et peuvent conduire à des résultats sensiblement différents.

$R_x$  = rendement massique brut en pourcentage contrôlé lors de l'essai et à l'indice x de matières volatiles.

$CF_x$  = taux de carbone fixe sur anhydre du charbon à indice x de matières volatiles.

## Remarques

Cette formule est donnée en considérant le taux de cendres comme une constante quel que soit le taux de matières volatiles du charbon. Cette formule est applicable tant que le taux de cendres du charbon est inférieur à 5 %, après quoi il convient d'effectuer une correction pour tenir compte de la variation du taux de carbone fixe en fonction de la teneur en cendres.

## Commentaires

Cette notion de rendement massique pondéré, qui permet de comparer différents essais entre eux, exprime aussi, pour un faible écart-type des R80 d'un même matériel, la fiabilité et la reproductibilité des résultats et, par voie de conséquence, la relativement faible influence des facteurs externes comme le savoir-faire du carbonisateur sur les résultats de carbonisation.

Cette homogénéité de résultat n'apparaît pas de manière évidente à partir du rendement massique brut lorsque le taux de carbone fixe varie.

## MODE OPÉRATOIRE

- Pesée du charbon en totalité (PC) immédiatement après défournement.
- Détermination par calcul du volume en eau (V) du four.

## EXPRESSION DES RÉSULTATS

Le rendement technologique exprimé en kg/m<sup>3</sup> est donné par la formule :

$$R_t = \frac{PC}{V} \quad \text{⑥}$$

## Commentaires

Ce ratio très important au niveau économique introduit une notion de productivité que le rendement massique brut ne traduit que de manière incomplète.

Une mauvaise appréciation du rendement technologique d'un procédé, souvent consécutive à une surestimation du coefficient de remplissage des fours, se traduit au

niveau économique par l'impossibilité d'atteindre les objectifs de production avec le matériel disponible, alors que l'ensemble des charges fixes reste constant.

Il est à noter que ce ratio ne présente aucun intérêt pour les procédés traditionnels (meules ou fosses) dont le volume est variable ou peut être facilement modifié.

## RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE

### OBJET

Le rendement énergétique brut (Re) de la transformation du bois en charbon est le rapport entre l'énergie calorifique potentielle du charbon produit et l'énergie calorifique potentielle du bois brut initial.

La connaissance de ce ratio prend tout son intérêt dans une approche plus générale lorsqu'il s'agit de comparer des technologies assez différentes l'une de l'autre (carbonisation - torréfaction, par exemple, ou carbonisation avec ou sans récupération des fumées) et quand la notion de productivité n'est plus seule en jeu mais que le bois ou la biomasse dans une région devient rare et/ou chère.

### MODE OPÉRATOIRE

- Pesée du bois humide en totalité (PH) avant enfournement.
- Détermination du pouvoir calorifique inférieur (PCIb) du bois brut selon le protocole (ou en faire l'estimation selon le tableau, p. 60).

● Pesée du charbon dans sa totalité (PC) immédiatement après défournement.

● Détermination du pouvoir calorifique inférieur (PCIc) du charbon selon le protocole en Annexe 4, p. 62.

### EXPRESSION DES RÉSULTATS

Le rendement énergétique brut Re exprimé en pourcentage est donné par la formule :

$$Re = \frac{PC \times PCIc}{PH \times PCIb} \times 100 \quad \text{⑦}$$

### Remarques

Si un combustible d'appoint a été utilisé pour initier ou entretenir le processus de carbonisation, l'énergie fournie au système doit être prise en compte et on peut définir un rendement énergétique net (Ren) exprimé en % comme le rapport :

$$Ren = \frac{PC \times \text{PCI du charbon anhydre}}{(PH \times \text{PCI du bois brut}) + E} \times 100 \quad \text{⑧}$$

où : E est l'énergie fournie au système.

E = masse de combustible × PCI du combustible.

## ANNEXES

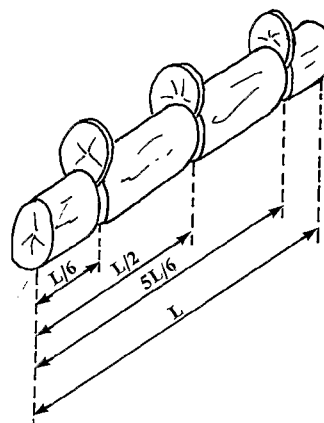
### 1.

### DÉTERMINATION DU TAUX D'HUMIDITÉ SUR BRUT D'UN BOIS

A partir d'échantillons représentatifs d'un lot de bois à carboniser, nous nous proposons de :

- Sélectionner 9 à 12 pièces de bois de classes de diamètre différentes (gros-moyen-petit).
- Prélever trois rondelles de 2 cm d'épaisseur de part et d'autre et au centre du rondin (schéma ci-contre).
- Peser rapidement les rondelles en laboratoire, soit ph, masse à l'humidité (H %).
- Sécher les rondelles à l'étuve à 105 °C pendant 48 h.
- Peser immédiatement les rondelles sèches, soit po leur masse anhydre.
- La formule suivante permet de calculer l'humidité, sur brut, du bois :

$$H\% \text{ brut} = \frac{ph - po}{ph} \times 100$$



Prélèvement de rondelles-échantillons sur un rondin.  
Slice sampling from a log.

**2.**  
**TABLEAU D'ÉQUIVALENCE HUMIDITÉ SUR ANHYDRE**  
**ET SUR MASSE BRUTE**  
**ET POUVOIR CALORIFIQUE INFÉRIEUR CORRESPONDANT**

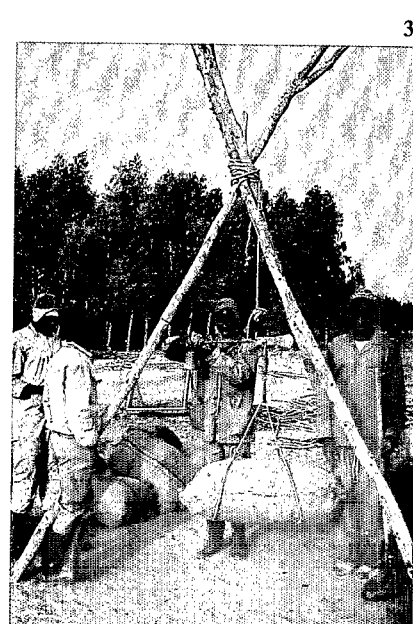
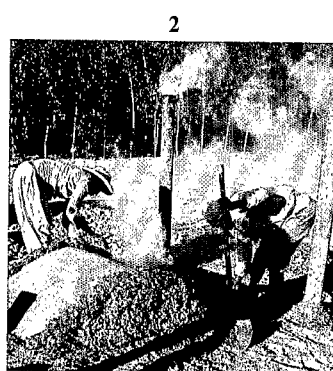
Humidité sur masse brute (E %)	Humidité sur masse anhydre (H %)	Pouvoir calorifique en thermies par tonne de produit brut	Pouvoir calorifique (en MJ/t)
10	11,10	3 880	16 240
15	17,60	3 630	15 200
16	19,00	3 580	14 900
17	20,50	3 530	14 700
18	21,90	3 480	14 560
19	23,50	3 430	14 360
20	25,00	3 380	14 140
21	26,60	3 330	13 940
22	28,20	3 280	13 730
23	29,90	3 230	13 500
24	31,60	3 180	13 300
25	33,30	3 130	13 100
26	35,10	3 080	12 890
27	36,90	3 030	12 680
28	38,80	2 980	12 470
29	40,80	2 930	12 270
30	42,80	2 880	12 050
31	45,00	2 830	11 840
32	47,00	2 780	11 630
33	49,20	2 730	11 430
34	51,50	2 680	11 220
35	53,80	2 630	11 000
36	56,30	2 580	10 800
37	58,70	2 530	10 590
38	61,30	2 480	10 380
39	64,00	2 430	10 170
40	66,60	2 380	9 960
41	69,50	2 330	9 750
42	72,40	2 280	9 540



Humidité sur masse brute (E %)	Humidité sur masse anhydre (H %)	Pouvoir calorifique en thermies par tonne de produit brut	Pouvoir calorifique (en MJ/t)
43	75,40	2 230	9 330
44	78,60	2 180	9 120
45	81,80	2 130	8 910
46	85,20	2 080	8 700
47	88,70	2 030	8 500
48	92,30	1 980	8 290
49	96,00	1 930	8 080
50	100,00	1 880	7 870
55	122,20	1 540	6 450
60	150,00	1 280	5 360
65	185,70	1 020	4 270
70	233,30	760	3 180
75	300,00	500	2 090

Source : Philippe ROBERT : « De la forêt aux chaufferies à bois ».

## CONTRÔLE DES PERFORMANCES D'UNE CARBONISATION EN FOSSE AU SÉNÉGAL PERFORMANCE CONTROL OF A CARBONIZATION IN A SENEGALESE PIT



- 1      *Pesée du bois*  
*Wood weighing*
- 2      *Carbonisation*  
*Carbonization*
- 3      *Pesée du charbon*  
*Charcoal weighing*

### 3.

## VARIATION DU COEFFICIENT DE REMPLISSAGE D'UN FOUR

TABLEAU ÉTABLI À PARTIR DE RÉSULTATS MOYENS  
obtenus sur la Base expérimentale du C.T.F.T.

Forme du four	Volume en eau four - m <sup>3</sup>	Nature de l'approvisionnement	Coefficient de remplissage kg bois anhydre/m <sup>3</sup>
Cylindrique	4,5	rondins papetiers (1 m)	189
Cylindrique	4	rondins papetiers (1 m)	159
Cylindrique	2	rondins papetiers (0,3 m)	194
Cylindrique	2	déchets de scierie (0,3 m)	135
Cylindrique	4	déchets de scierie (1 m)	140
Cylindrique	4	rondins papetiers toutes longueurs rangement très soigné	360
Cylindrique	5	déchets de menuiserie (0,3 m)	210
Cylindrique	8	déchets de scierie (1 m)	169
Cylindrique	8	rondins papetiers (0,3 m)	228
Cylindrique	8	rondins papetiers (0,3 m)	318
Cylindrique	8	déchets de scierie (1,2 m)	121
Rectangulaire	4,5	déchets de scierie (2 m)	177
Carré	8	déchets de scierie (2 m)	165
Carré	8	rondins papetiers (2 m)	208
Carré	8	déchets (2 m) rangement très soigné	320

*Remarques* : des variations assez importantes peuvent également intervenir en fonction de la densité du bois.

### 4.

## POUVOIR CALORIFIQUE

#### DÉFINITION

Selon la norme NF M03-005, on appelle « pouvoir calorifique » d'un corps la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité de masse de ce corps. Le pouvoir calorifique s'exprime en joules par kg.

Le pouvoir calorifique est dit « pouvoir calorifique supérieur » (P.C.S.) quand l'eau, formée au cours de la combustion, est condensée (récupération de la chaleur latente de condensation). Ces conditions sont celles des mesures à la bombe calorimétrique.

Le pouvoir calorifique est dit « pouvoir calorifique inférieur » (P.C.I.) quand la combustion est effectuée à pression constante, c'est-à-dire à l'air libre. Dans ce cas, l'eau de combustion n'est pas condensée. C'est ce qui se passe lors de l'utilisation pratique du bois.

#### PRINCIPE

Combustion d'une prise d'essai de masse déterminée en présence d'oxygène dans une bombe calorimétrique plongée dans un volume d'eau connu.

# DIVERSITÉ DES MATÉRIELS DE CARBONISATION

## DIVERSITY OF CHARCOAL MAKING TECHNOLOGIES

### PROCÉDÉS ARTISANAUX TRADITIONAL CHARCOAL MAKING



**Meule**  
*Charcoal stack*

### PROCÉDÉS INDUSTRIELS INDUSTRIAL PROCESS



**Four métallique fixe**  
*Settled metal kiln*



**Four métallique itinérant**  
*Roving charcoal metal kiln*



**Four industriel**  
*Industrial kiln*

Le pouvoir calorifique supérieur déterminé dans ces conditions, c'est-à-dire à volume constant, se calcule à partir de l'élévation de température constatée de l'eau.

La valeur en eau du calorimètre aura été préalablement déterminée à l'aide d'un étalon. Parallèlement, on doit procéder à une détermination de l'humidité de l'échantillon.

## APPAREILLAGE

### ÉCHANTILLONNAGE

Bois : petits morceaux ( $< 1 \text{ cm}^3$ ) ou poudre si présence d'écorce.

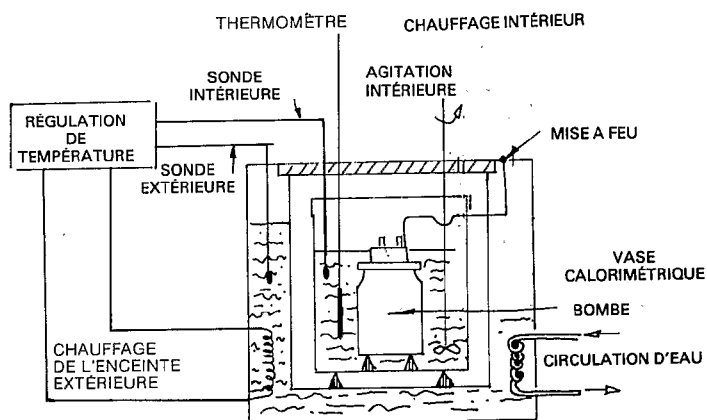
Charbon : fines de diamètre inférieur à 0,20 mm. Échantillons non étuvés au préalable.

### MODE OPÉRATOIRE

Peser à 0,1 mg près, dans la coupelle, une masse de combustible permettant d'obtenir une élévation de température de 2,5 à 3,5 °C (1 g pour le bois, 0,8 g pour le charbon).

- Relier les 2 bornes de la bombe par un fil d'allumage de longueur et de pouvoir calorifique connus. Ce fil devra être en contact avec l'échantillon.
- Introduire la coupelle dans la bombe. Ajuster le couvercle et le visser sur le corps de la bombe.
- Charger avec précaution la bombe en oxygène jusqu'à une pression de 25 à 30 bars.
- Introduire dans le vase calorimétrique une quantité d'eau suffisante pour immerger la face supérieure du couvercle de la bombe. Cette quantité, vérifiée par pesée, doit être la même à 1 g près que celle utilisée au cours de l'étalonnage pour la détermination de la capacité calorifique effective.
- Placer la bombe dans le vase calorimétrique et celui-ci dans la jaquette, ajuster le thermomètre, établir les connexions et mettre l'agitateur en marche. La température de l'eau du calorimètre à jaquette adiabatique doit être inférieure à la température ambiante de 1 °C à 1,5 °C.
- Régler la température de la jaquette afin qu'elle soit égale ou légèrement inférieure à celle du vase calorimétrique et attendre 5 min. pour obtenir l'équilibre. Ajuster la température de la jaquette de manière qu'elle soit égale à  $\pm 0,01$  °C près à celle du vase calorimétrique et attendre 3 min.
- Noter la température initiale et fermer le circuit électrique pour provoquer l'inflammation.

• Observer la température du vase calorimétrique toutes les minutes jusqu'à ce que 3 lectures successives soient identiques. Noter cette température comme température maximale, les observations thermométriques seront lues à 0,002 °C au moyen d'un dispositif donnant cette précision.



Calorimètre adiabatique : schéma de l'appareillage.

Source : « Guide Technique de la Carbonisation ». EDISUD.

*Adiabatic calorimeter : diagram of the apparatus.*

- Retirer la bombe du calorimètre, la laisser reposer pendant 10 min., réduire lentement la pression, ouvrir la bombe.
- Vérifier si la combustion est complète, c'est-à-dire s'il n'y a pas de dépôt de suie à l'intérieur de la bombe ou des traces de carbone résiduel sur les parois de la coupelle.
- Mesurer la longueur du fil d'allumage métallique qui n'a pas brûlé.
- Rincer soigneusement l'intérieur de la bombe et du couvercle avec un peu d'eau distillée et verser cette eau de rinçage en même temps que celle mise primitivement au fond de la bombe, dans une fiole de 400 ml, en vue du dosage des acides qui se sont formés au cours de la combustion.

### EXPRESSION DES RÉSULTATS

Le pouvoir calorifique supérieur à volume constant  $P_v$  de l'échantillon non étuvé est donné par la formule suivante en joules par gramme :

$$P_v = \frac{(4,1855 \times E (t_m - t_i) - (a + b))}{M}$$

Le pouvoir calorifique supérieur à volume constant sur un échantillon anhydre est égal à :

$$P_e \times \frac{100}{100 - h_1}$$

avec :

$E$  = équivalent en eau du calorimètre, de la bombe, de leurs accessoires et de l'eau introduite dans la bombe ( $E$  est calculé en faisant au moins 5 déterminations concordantes du pouvoir calorifique supérieur de l'acide benzoïque de qualité « étalon pour calorimétrie » (26 450 kJ/kg)).

$t_i$  = température initiale en °C.

$t_m$  = température maximale en °C.

a = correction nécessitée par la formation d'acides (la totalité des acides est dosée avec une solution de carbonate de sodium. Indicateur rouge de méthyle). Compter 12,56 joules par millilitre de solution de carbonate de sodium 0,1 N.

b = correction nécessitée par la chaleur de combustion du fil d'allumage (49,6 J par cm de fil brûlé).

M = masse de la prise d'essai en grammes.

h1 = humidité de l'échantillon sec à l'air en pourcentage en masse.

Le P.C.I. se déduit par le calcul du P.C.S. en connaissant le nombre de molécules d'eau formées et la chaleur dégagée par le passage de l'état de vapeur d'eau à l'état liquide, à la température initiale.

On admet généralement pour un produit anhydre la formule moyenne approchée suivante :

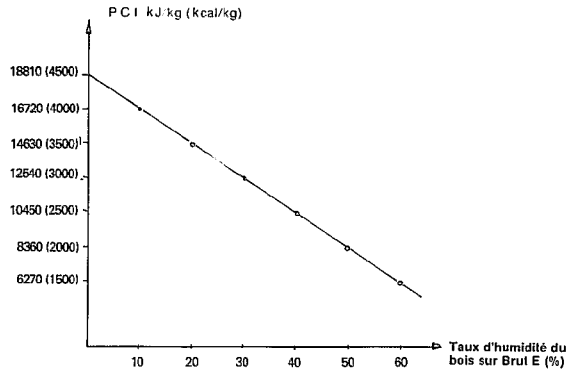
$$\text{P.C.I.} = \text{P.C.S.} - 2\,508 \times 9\,h \text{ en kJ/kg.}$$

h étant le % pondéral d'hydrogène dans le bois, 2 508 kJ/kg étant la valeur de la chaleur latente de condensation de l'eau à 0 °C.

Pour 6 % d'hydrogène (teneur moyenne du bois), nous avons donc :

$$\text{P.C.I.} = \text{P.C.S.} - 1\,354 \text{ en kJ/kg.}$$

Dans la pratique, le P.C.I. d'un corps varie dans de fortes proportions suivant son degré d'humidité. La quantité de chaleur fournie diminue quand la teneur en eau du bois augmente (cf. figure ci-dessus).



Evolution du P.C.I. d'un bois (ayant un P.C.I. anhydre de 18 810 kJ/kg - 4 500 kcal/kg -) en fonction de son taux d'humidité.

*Variation of wood calorific value with its moisture content (reference : 18 810 kJ/kg on dry basis).*

Les formules suivantes peuvent être utilisées pour le calcul du P.C.I. du bois en fonction de son humidité :

Si E = humidité du bois en % du bois brut :

$$P_e = P_0 \times \frac{100 - E}{100} - 25,08 \times E \text{ en kJ/kg}$$

avec :  $P_e$  = P.C.I. à humidité E (kJ/kg)

$P_0$  = P.C.I. sur bois anhydre (kJ/kg) ■