

Une évaluation de la technique de la carbonisation en meule

Yves Schenkel ⁽¹⁾, Paul Bertaux ⁽²⁾, Stéphane Vanwijnsberghe ⁽³⁾, José Carré ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Station de Génie rural. Centre de Recherches agronomiques de Gembloux. Chaussée de Namur, 146. B-5030 Gembloux (Belgique).

⁽²⁾ Unité d'Économie et Gestion forestières. Faculté universitaire des Sciences agronomiques de Gembloux. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique). ⁽³⁾ Bureau d'Étude AGRER. Rue du Magistrat, 2. B-1040 Bruxelles (Belgique).

Reçu le 4 juillet 1996, accepté le 8 octobre 1996.

Après avoir examiné les différents types de meule de carbonisation utilisés de par le monde ainsi que les points particuliers relatifs à leur construction et à la conduite de la carbonisation en meule, nous analysons les différents indicateurs permettant d'apprécier l'efficacité d'une carbonisation tant sur le plan quantitatif que sur le plan qualitatif : rendement massique, rendement énergétique, rendement massique pondéré. Ensuite, nous comparons la technique de carbonisation en meule à d'autres techniques de carbonisation améliorées. Cette comparaison montre que la méthode de la meule peut donner d'aussi bons résultats que les autres méthodes de carbonisation, aussi bien en termes de rendement massique (20–25 % masse anhydre) qu'en termes de teneur en carbone fixe (supérieure à 75 % masse anhydre).

Mots-clés. Carbonisation, rendement massique, rendement énergétique, meule, qualité du charbon de bois, pays en développement, technique améliorée.

Assessment of the mound kiln carbonization technique. In this paper, we firstly analyse the different kinds of earth kiln carbonization methods used around the world, including a brief description of their construction and operational aspects. Then we analyse various indicators assessing the quantitative and qualitative efficiency of a carbonization: mass yield, energy yield, balanced mass yield. Finally we compare the earth kiln carbonization technique to other improved carbonization methods. The comparison shows that the earth kiln method could be as efficient as improved methods, and is characterized by mass yields ranking from 20 to 30% (dry basis) and by fixed carbon contents above 75% (dry basis). The key factor of the earth kiln carbonization method is the know-how of the charcoal maker.

Keywords. Carbonization, mass yield, energy yield, earth kiln, charcoal quality, developing countries, improved technique.

INTRODUCTION

Parmi les méthodes de carbonisation traditionnelles, la technique de la meule est encore aujourd'hui très largement pratiquée dans les pays en développement. Utilisée depuis des siècles à travers le monde, elle a quasi été abandonnée en Europe, principalement pour des raisons de rentabilité. En effet, l'importance de la main-d'oeuvre nécessaire à la confection et à la conduite d'une meule, rend cette technique totalement dépassée dans nos pays industrialisés.

Cependant, la situation est différente dans les pays en développement où la meule traditionnelle et la meule améliorée sont encore les procédés de carbonisation les plus répandus. Au Burundi, par exemple, près de 99 % du charbon de bois est produit par la méthode traditionnelle (Adam, 1990), ce malgré l'existence de plusieurs projets formant des charbonniers aux techniques dites "améliorées". À l'heure actuelle, la méthode de la meule fait l'objet de nombreuses controverses. D'une part, ses détracteurs lui trouvent des difficultés de mise en oeuvre ainsi que de médiocres rendements ; on peut également

s'interroger sur l'impact environnemental de cette méthode. D'autre part, beaucoup pensent que cette technique est la seule réellement adaptée aux conditions locales : faible investissement, emploi d'une main-d'oeuvre nombreuse, mobilité du système.

L'objectif de ce document est de contribuer à faire le point sur les procédés de carbonisation en meule : les avantages et inconvénients, les performances ainsi que les conditions d'utilisation de cette méthode seront examinés. Nous analyserons également la place à réserver à cette technique en tant que système de production dans les pays en développement.

ASPECTS TECHNIQUES

Les meules font partie des systèmes de carbonisation à combustion partielle de la charge, au même titre que les fours métalliques ou les fosses : une partie de la charge de bois doit être brûlée afin de libérer l'énergie nécessaire au séchage et à la carbonisation de la masse. Nous reviendrons plus loin sur les avantages et inconvénients de ce procédé, mais signalons d'ores et déjà deux caractéristi-

ques de la meule la distinguant des autres systèmes de carbonisation : simplicité des matériaux utilisés (branchage, paille, terre) et main-d'oeuvre exigeant un important savoir-faire.

Types de meule

Classiquement, on distingue trois types de meule de carbonisation : la meule verticale traditionnelle, la meule horizontale et la meule améliorée, représentée essentiellement par la meule casamançaise (Briane, Doat, 1985 ; FAO, 1983 ; Foley, 1986).

La meule verticale traditionnelle. De base circulaire, cette meule est constituée de bois disposés verticalement autour d'un pieu central et de petits bois soigneusement rangés dans les interstices (**Figure 1**). La meule réalisée, le pieu central est retiré afin de ménager une cheminée. Le recouvrement est composé de matière végétale (paille, herbe, branchages) surmontée d'une couche de terre, si possible sableuse ou limoneuse.

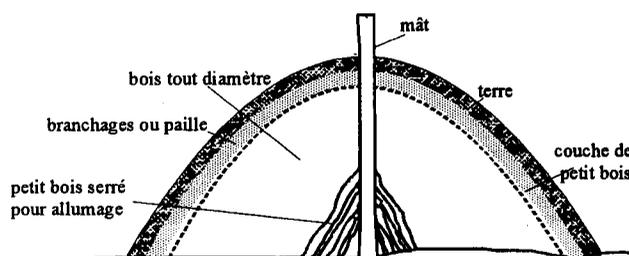


Figure 1. Meule verticale (d'après Briane, Haberman, 1984) — *Vertical mound kiln.*

L'allumage de la charge s'effectue au centre de la meule en laissant tomber des braises dans la cheminée. Après que le feu soit monté dans cette cheminée, le front de carbonisation progresse de haut en bas en éventail. La conduite de cette meule nécessite un grand savoir-faire et une surveillance quasi permanente.

Lorsque la carbonisation est terminée, la meule est recouverte d'une couche de terre supplémentaire afin de la rendre étanche pendant le refroidissement. La durée de la carbonisation est de l'ordre de 50 heures pour les petites meules (~ 10 stères). Quant au refroidissement, il peut durer plusieurs jours.

La meule horizontale. Ce type de meule est très proche du précédent en ce qui concerne la couverture et la conduite (**Photo 1**). Sa forme se rapproche d'un demi cylindre aplati. Les deux différences significatives par rapport au procédé précédent sont les suivantes :

- le bois est rangé à l'horizontale (longitudinalement) ;
- le front de carbonisation se déplace d'une extrémité à l'autre de la meule.

Dans le cas de la meule horizontale, la charge est placée transversalement sur une série de rondins mis bout à bout, constituant ainsi une grille de circulation de l'air (Foley, 1986 ; Lusadisu, 1989 ; Schenkel, 1991 ; Quivy, 1992), tandis qu'Hibajene (1994) signale en Zambie une disposition de la charge non plus transversale mais longitudinale. Les petits bois sont utilisés pour remplir les interstices laissés entre les rondins (**Figure 2**).

L'allumage frontal s'effectue du côté sous le vent. Dans le cas d'une meule de grande dimension, le défournement de la zone déjà cuite (côté allumage) peut s'effectuer avant la fin de la carbonisation complète. Le volume de bois des meules horizontales peut aller jusqu'à 100 stères, le cycle complet de carbonisation durant alors plus de 3 semaines (Schenkel, 1991).

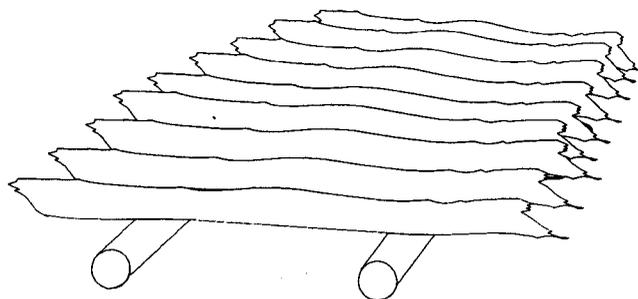


Figure 2. Construction de la base de la meule horizontale — *Horizontal mound kiln construction.*

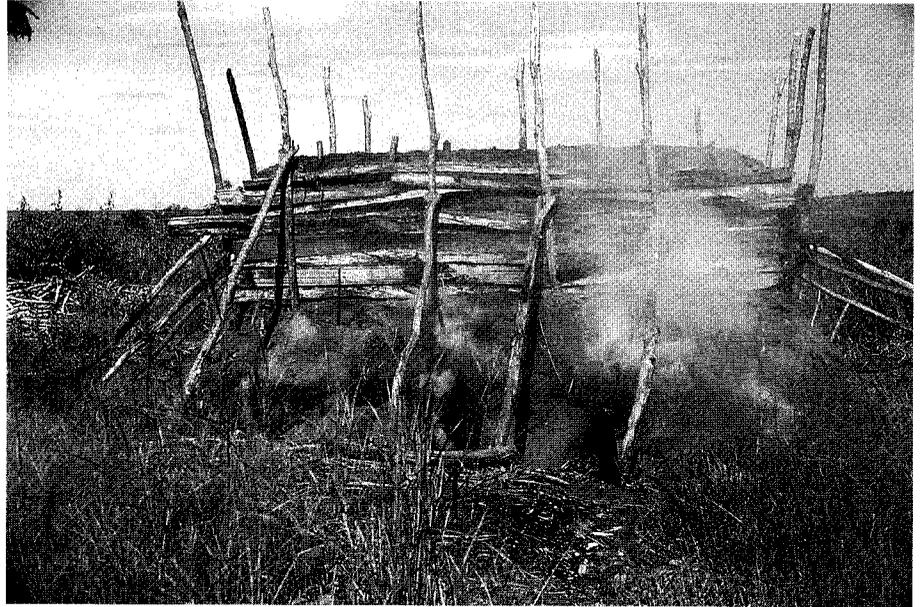
Les meules améliorées. La meule améliorée la plus largement diffusée est la meule casamançaise (**Figure 3**). Elle présente plusieurs évolutions destinées à améliorer, à accélérer et à faciliter la carbonisation et sa conduite.

La construction de cette meule exige une bonne circulation de l'air (plancher de petits bois et aménagement d'évents à l'aide de tuyaux situés à la base de la meule) ainsi qu'un rangement préférentiel des rondins (petits bois à la périphérie et gros bois au centre de la meule). La couverture quant à elle ne subit pas de modifications par rapport aux meules traditionnelles.

Cependant, la principale amélioration consiste en l'utilisation d'une cheminée fabriquée à partir de matériaux peu onéreux (vieux fûts de 200 L). Elle permet une carbonisation plus rapide et une conduite plus aisée en forçant la circulation des gaz. De plus, les rendements seraient améliorés grâce au tirage inversé. Une meule de 100 stères nécessite 3 jours de carbonisation et 4 jours de refroidissement.

Un autre type de meule améliorée est utilisé en Somalie (Robinson, 1988). Sa caractéristique principale est un recouvrement simple d'une grande partie de la charge de bois par des feuilles de métal (déroulage de vieux fûts à huile). Celles-ci constituent une couverture fiable ne nécessitant pas de constants jointoyages et assurent ainsi

Photo 1. Meule horizontale (d'après Schenkel, 1991) — *Horizontal mound kiln.*



une étanchéité efficace de la charge en carbonisation. De plus, grâce à ces tôles, le charbon n'est pas souillé par la terre de couverture nécessaire aux autres types de meule. La conduite de cette meule s'effectue en tirage inversé avec allumage au sommet alors que les entrées d'air et sorties de fumées se situent à la base de la meule.

Conduire une meule de carbonisation

Tout l'art de la conduite d'une meule consiste, après un chargement soigneux, à gérer une bonne circulation des gaz chauds dans la charge pour obtenir un rendement de séchage et une avancée du front de carbonisation efficaces tout en assurant l'étanchéité de la couverture. Quel que soit le type de meule, la conduite de la carbonisation repose principalement sur le jeu des entrées d'air et des cheminées. L'observation de la couleur des fumées et de l'affaissement de la couverture guide l'opérateur dans la conduite de la carbonisation.

Il n'existe pas de façon unique de construire ou de conduire une meule. Les méthodes diffèrent selon la

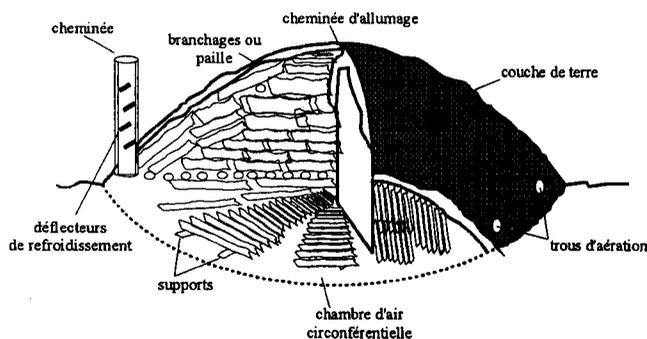


Figure 3. Meule casamançaise (d'après Briane, Haberman, 1984) — *Casamance mound kiln.*

capacité de la meule, les caractéristiques du bois (essence, humidité, dimension) et les habitudes locales. Les quelques observations suivantes ont été rassemblées par Briane et Haberman (1984) pendant la confection et la conduite d'une meule verticale traditionnelle en France. Bien que celle-ci soit de faible capacité (~ 7 stères), elle correspond au type de meule non améliorée utilisé à travers le monde.

Le mât central est retiré de façon à pouvoir introduire au fond de la meule quelques pelletées de braises, destinées à allumer le cône de petit bois. La cheminée est ensuite comblée avec un sac de fines de charbon (Figure 4a). Après que le feu soit monté au sommet de la meule, la cheminée est bouchée et le tirage s'inverse. Les entrées d'air se font uniquement par la non-étanchéité de la couverture à mi-hauteur (Figure 4b).

Quelques ouvertures sont pratiquées à la base de la meule de manière à faire descendre le front de carbonisation de la partie supérieure déjà cuite. Celui-ci descend et se visualise par de la fumée bleue s'échappant de plus en plus bas (Figure 4c et 4d). Si le vent se lève, il est nécessaire de protéger le côté au vent de façon à éviter une progression asymétrique de la carbonisation. Dans la meule horizontale, les événements sont disposés à la base et sur le pourtour de la meule, de manière à guider l'avancement du front de carbonisation.

Les interventions sont permanentes pour maintenir l'étanchéité de la couverture et pour recouvrir définitivement les zones déjà carbonisées. La durée de la carbonisation atteint 50 heures tandis que le refroidissement nécessite une quarantaine d'heures.

Observations et commentaires

– Confection : elle exige beaucoup de savoir faire pour réaliser un rangement serré et homogène ; la manutention est importante.

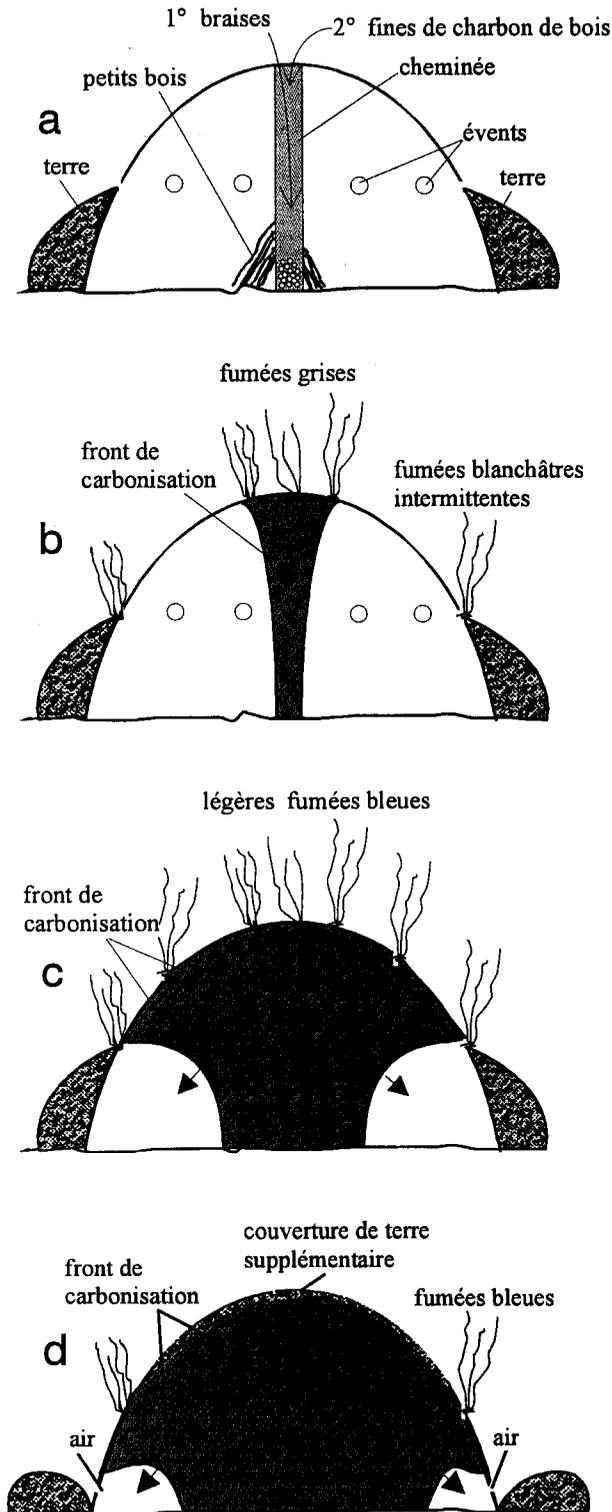


Figure 4. Conduite de la carbonisation en meule — *Mound kiln carbonization.*

– Conduite : le front de carbonisation progresse de haut en bas en éventail. La surveillance est permanente et les interventions fréquentes. La conduite, basée sur l’observation, nécessite une bonne qualification de l’opérateur. Le

vent peut s’avérer très gênant pour mener une carbonisation homogène ; de même, pendant la saison des pluies, la pratique de la carbonisation en meule est extrêmement difficile.

– Défournement : seuls les rondins touchant le sol sont incuits ; le tas de cendres central provient du cône de bois d’allumage. Il est conseillé de défourner le charbon par secteurs pour éviter une reprise de la meule en cas de refroidissement insuffisant.

Ces informations sont confirmées par de nombreux auteurs, quel que soit le type de meule (verticale, horizontale, casamançaise).

LES RENDEMENTS DE LA CARBONISATION

L’objectif de la carbonisation est bien de produire un combustible solide – le charbon de bois – à partir d’une matière première – le bois – en optimisant l’efficacité de l’opération à la fois sur le plan quantitatif – produire une quantité maximale de charbon de bois à partir d’une quantité donnée de bois – que sur le plan qualitatif – produire un charbon de bois contenant plus ou moins de matières volatiles, donc un taux de carbone fixe minimum. Cette opération est conditionnée par un certain nombre de facteurs : température finale de carbonisation ; gradient de température ; temps de traitement ; humidité du bois ; dimensions des pièces de bois ; essence ; conditions climatiques.

L’appréciation de l’efficacité de l’opération de carbonisation est classiquement réalisée par la détermination du rendement massique. Cependant, la maximisation de la quantité de charbon de bois produit et de sa qualité évoluent de manière contradictoire, ainsi que l’illustre la **figure 5** : toutes choses étant égales, un charbon de haute qualité (à haute teneur en carbone fixe) ne peut s’obtenir que par une carbonisation à haute température qui correspond à un rendement en masse faible. Il s’agit donc bien d’optimiser la carbonisation pour produire une quantité maximale de charbon de bois de la qualité désirée.

Rendement massique

Le rendement massique se calcule par le rapport de la masse de charbon de bois produit sur la masse de bois utilisée. Il peut être calculé sur base anhydre ou sur base humide par les rapports

$$RM_{ba} = \frac{M_{ca}}{M_{ba}} 100 \quad (1)$$

$$RM_{bh} = \frac{M_{ca}}{M_{bh}} 100 \quad (2)$$

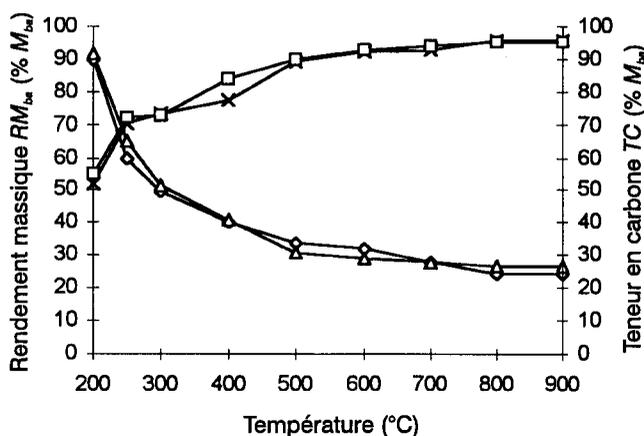


Figure 5. Évolutions du rendement massique (RM_{ba}) de carbonisation et de la teneur en carbone (TC) du charbon de bois produit en fonction de la température de carbonisation (d'après Briane, Doat, 1985 ; Humphreys, Ironside, 1980) — Evolutions of the mass yield (RM_{ba}) of carbonization and the carbon content (TC) of charcoal according to carbonization temperature.

—◇— RM_{ba} —×— TC (Briane, Doat)
 —△— RM_{ba} —□— TC (Humphreys, Ironside)

où

RM_{ba} = rendement massique de carbonisation sur base anhydre (%);

RM_{bh} = rendement massique de carbonisation sur base humide (%);

M_{ca} = masse de charbon de bois anhydre (kg);

M_{ba} = masse de bois anhydre (kg);

M_{bh} = masse de bois humide (kg).

Nous conseillons l'utilisation de la première expression : c'est à partir de la masse anhydre de bois que le charbon est produit, et non à partir de l'eau qu'il contient. Une humidité plus élevée du bois empêche la réaction de monter en température et nécessite une quantité d'énergie plus importante pour être éliminée. La masse anhydre du bois est une constante quelle que soit son humidité. L'interprétation des données de rendement nécessite, toujours, de connaître l'humidité du bois. Malheureusement, cette donnée est bien souvent absente ou mal définie.

Rendements combinés

Le rendement massique seul ne suffit pas à évaluer le bilan complet d'une carbonisation car il n'inclut pas les éléments qualitatifs des résultats de la transformation du bois en charbon de bois. D'autres rendements sont alors utilisés. Un tel facteur est le rendement énergétique de carbonisation, dont la formule s'établit comme suit (1) :

$$RE = \frac{M_{ca} PCI_{ca}}{M_{ba} PCI_{ba}} 100 \quad (3)$$

où

RE = rendement énergétique de carbonisation (%);

M_{ca} = masse de charbon de bois anhydre produite à partir de M_{ba} (kg);

(1) Dans le cas où une source extérieure est nécessaire pour amorcer la carbonisation, il y a lieu d'ajouter la quantité d'énergie utilisée au dénominateur.

PCI_{ca} = pouvoir calorifique inférieur anhydre du charbon de bois ($MJ \cdot kg^{-1}$);

M_{ba} = masse initiale de bois anhydre (kg);

PCI_{ba} = pouvoir calorifique inférieur anhydre du bois ($MJ \cdot kg^{-1}$).

On rencontre également la formule analogue :

$$RE' = \frac{M_{ca} PCS_{ca}}{M_{ba} PCS_{ba}} 100 \quad (3')$$

où

RE' = rendement énergétique supérieur de carbonisation (%);

PCS_{ca} = pouvoir calorifique supérieur du charbon de bois ($MJ \cdot kg^{-1}$);

PCS_{ba} = pouvoir calorifique supérieur du bois anhydre ($MJ \cdot kg^{-1}$).

L'utilisation de ces formules nécessite la détermination du pouvoir calorifique à la fois du bois et du charbon de bois à partir d'un calorimètre adiabatique. Cet équipement n'est pas toujours disponible, surtout dans les pays en développement, ce qui explique que, malheureusement, cette variable est très rarement donnée dans la littérature. Un autre facteur pourrait alors être utilisé, défini par Girard (1992), le rendement massique pondéré :

$$RMP_{80} = \frac{RM_x TC_x}{80} \quad (4)$$

où

RMP_{80} = rendement massique correspondant à une teneur en carbone fixe de 80 %;

RM_x = rendement massique correspondant à la teneur en matières volatiles x (%);

TC_x = teneur en carbone fixe correspondant à la teneur en matières volatiles x (%).

L'auteur considère que la formule est applicable si la teneur en matières minérales est inférieure à 5 %. À notre sens, ce facteur doit néanmoins être interprété avec la plus

grande prudence. En effet, le **tableau 1** montre que pour une teneur en matières volatiles donnée, donc pour une température de carbonisation donnée, le produit du rendement massique par la teneur en carbone fixe n'est pas une constante mais bien une valeur décroissante non linéaire avec l'élévation de la température de carbonisation. L'estimation du rendement massique pondéré est donc biaisée. Cependant, un indicateur d'évaluation de la carbonisation, basé sur la détermination simple du rendement massique et de la teneur en carbone fixe, serait un outil extrêmement utile aux techniciens et énergéticiens travaillant dans ce domaine. Cet indicateur sera développé dans une publication future.

PERFORMANCES DE DIVERS TYPES DE MEULE À TRAVERS LE MONDE

De nombreuses expérimentations ou mesures ont été réalisées à travers le monde afin d'évaluer et de comparer les performances et les conditions d'utilisation des différents types de meule. Le **tableau 2** présente quelques résultats obtenus à partir de ces essais. Il faut noter que ces expérimentations ont été réalisées dans des conditions extrêmement variables : sites d'expérimentation, qualification des opérateurs, précision des mesures réalisées, etc.

Il est bien souvent regrettable de constater un manque d'informations sur les essais réalisés *in situ* et ceci aussi bien sur les caractéristiques du bois utilisé (humidité, dimension des rondins, essence) que sur la qualité du charbon de bois récolté (teneur en carbone fixe). Il est donc souvent très difficile de comparer entre elles les méthodes de carbonisation sur base d'études réalisées selon des schémas expérimentaux différents.

Au regard des différentes restrictions que nous venons d'énoncer, les valeurs obtenues et les comparaisons entre celles-ci fournissent plutôt un ordre de grandeur qu'une confrontation rigoureuse.

La première constatation qui ressort du **tableau 2** est l'extrême variabilité des rendements massiques *sensu stricto* obtenus par les meules traditionnelles et améliorées. En effet, ceux-ci varient du simple (11 %) au quadruple (40 %). Comme nous l'avons déjà dit, les conditions de carbonisation des différents essais ne sont pas comparables mais de telles différences de performances, quelles qu'en soient les raisons, peuvent déjà expliquer les controverses et l'existence de défenseurs et de détracteurs de ce système de carbonisation. Dans le même ordre d'idée, il semble difficile de mettre en évidence une différence de rendement entre les meules traditionnelles et casamançaises, ces dernières montrant des performances variant du simple au double. Par contre, un aspect ressort nettement de la comparaison entre meule traditionnelle et casamançaise : la durée du cycle de carbonisation est largement réduite lors de l'utilisation de cette dernière. Cette caractéristique de la meule casamançaise est déterminante quand on sait qu'un des principaux inconvénients de la meule est son exigence en main-d'oeuvre et en surveillance.

La variabilité des rendements obtenus peut s'expliquer également par l'exigence en qualification de l'opérateur qui influence considérablement la conduite et les performances de la meule.

Ajoutons ici que les chiffres de rendement massique de carbonisation et de teneur en carbone fixe cités par Robinson (1988) nous apparaissent comme étant très élevés, voire sujets à caution. Nous ne les retiendrons donc pas dans la suite de notre analyse.

Tableau 1. Produit du rendement massique de carbonisation et de la teneur en carbone fixe pour différentes températures de carbonisation (d'après Briane, Doat, 1985 ; Humphreys, Ironside, 1980) — *Product of the carbonization mass yield by the carbon content, for different carbonization temperatures.*

Température (°C)	Briane et Doat				Humphreys et Ironside			
	RM_{ba} (% M_{ba})	TC (% M_{ca})	$RM_{ba} \cdot TC$	RMP_{80}	RM_{ba} (% M_{ba})	TC (% M_{ca})	$RM_{ba} \cdot TC$	RMP_{80}
200	90	55	4 950	62	91,8	52,3	4 801	60,0
250	60	72	4 320	54	65,2	70,6	4 603	57,5
300	50	73	3 650	46	51,4	73,2	3 762	47,0
400	40	84	3 360	42	40,6	77,7	3 155	39,4
500	34	90	3 060	38	31,0	89,2	2 765	34,6
600	32	93	2 976	37	29,1	92,2	2 683	33,5
700	28	94	2 632	33	27,8	92,8	2 580	32,2
800	24	95	2 280	29	26,7	95,7	2 555	31,9
900	24	95	2 280	29	26,6	96,1	2 556	31,9

RM_{ba} = rendement massique de carbonisation ; TC = teneur en carbone fixe du charbon de bois ; M_{ba} = masse initiale de bois anhydre ; M_{ca} = masse anhydre du charbon de bois ; RMP_{80} = rendement massique pondéré correspondant à une teneur en carbone fixe de 80 %, défini par la formule (4).

Tableau 2. Résultats d'essais de carbonisation en meule réalisés dans divers pays — *Charcoal production with the mound kiln method: results gained in different countries.*

Pays	Source	Type de meule	Volume (stères)	Humidité du bois (% M_{ba})	RM_{ba} (% M_{ba})	TC (% M_{ca})	Durée (jours)
Zaïre	(1)	Traditionnelle	15	70,2–118,5	30,3–34,3	–	43
			40	59,2–106,5	21,2–29,8	–	45
	(2)	Casamançaise	15	37,1–50,4	29,3–33,5	–	9
			40	49,2–75,4	20,9–21,3	–	14
		Traditionnelle	120	25	21,1–25,6	70,9–85,1	30
Burundi	(3)	Traditionnelle	22	25–55	12	–	20
		Burundaise améliorée	22	25–55	19	–	5
		Casamançaise	16	25–55	19	–	4
	(4)	Traditionnelle, avec bois d'Eucalyptus	13	50–60	15,6–18,0 (*)	–	–
	bois de forêt naturelle	6	50–60	12,0–16,9 (*)	–	–	
France	(5)	Traditionnelle	7	29,9–42,9	30,6–32,4	72,6–78,2	2 (+ 2 de refroidissement)
Somalie	(6)	Améliorée (couverture en tôle)	30	21,1–32,8	39–42	73,1–84,7	6 (+ 10 de refroidissement)
Cuba	(7)	Traditionnelle	8	27,6–54,7	22,5–28,8	82,1–89,1	3 (sans refroidissement)
Zambie	(8)	Traditionnelle	6	28,2–34,4	21,5–27,0	65,2–71,6	27–31

M_{ba} = masse initiale de bois anhydre ; RM_{ba} = rendement massique de carbonisation ; TC = teneur en carbone fixe ; M_{ca} = masse anhydre de charbon de bois. (*) Rendement massique sur base humide.

(1) Lusadisu, 1989. (2) Schenkel, 1991. (3) Ramilison, 1990. (4) Eimer, Ndamana, 1987. (5) Briane, Haberman, 1984. (6) Robinson, 1988. (7) Quivy, 1992. (8) Hibajene, 1994.

À côté des méthodes traditionnelles, de nombreux projets de développement, soutenus par les agences de coopération nationales ou internationales, visent à promouvoir des techniques améliorées, telles que les fours métalliques portables, les fours en briques ou même les fosses améliorées. Le **tableau 3** nous donne un aperçu des avantages et inconvénients de ces différentes méthodes de carbonisation. Les objectifs essentiels de ces projets sont généralement d'améliorer les conditions de travail des charbonniers, d'augmenter leurs rendements de production et, en conséquence, de mieux utiliser les ressources naturelles, notamment forestières.

Il nous paraît intéressant de comparer les techniques améliorées sur ce point du rendement de production, c'est-à-dire de l'efficacité. Nous avons rassemblé dans le **tableau 4** des données publiées dans la littérature ou mesurées par les auteurs, relatives à des méthodes de carbonisation améliorées mais simples et de taille réduite, donc susceptibles de remplacer la technique de la meule.

Afin de comparer la technique de carbonisation en meule aux techniques améliorées, nous avons appliqué la méthode du rendement énergétique aux données des **tableaux 2** et **4** qui nous permettent son estimation : le pouvoir calorifique supérieur des essences utilisées est obtenu dans la littérature tandis que le pouvoir calorifique

supérieur du charbon de bois est obtenu par l'équation suivante, établie à partir de 55 couples de mesures de carbone fixe et de pouvoir calorifique effectuées dans notre laboratoire :

$$PCS_{ca} = 9,1994 TC^{0,2828}$$

pour $r = 0,990$

où

PCS_{ca} = pouvoir calorifique supérieur ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) ;

TC = teneur en carbone fixe (% M_{ca}) ;

r = coefficient de corrélation.

Les résultats du rendement énergétique des carbonisations en meule ou en technique améliorée sont donnés au **tableau 5**.

DISCUSSION

La technique de carbonisation en meule apparaît comme étant archaïque, peu performante, difficile à conduire. Elle garde cependant très largement les faveurs des charbonniers des pays en développement.

Par contre, l'important développement qu'ont connu les techniques de carbonisation améliorées en Amérique latine (les fours en briques argentins ou brésiliens), en Asie et

Tableau 3. Avantages et inconvénients des différents systèmes de carbonisation (Carré *et al.*, 1984) — *Advantages and disadvantages of different carbonization methods.*

Technique	Avantages	Inconvénients
Meule	Mobilité (tout terrain) Matériaux locaux Investissement nul Carbonise les gros bois sans refente Capacité ajustable Pas de débardage Utilisation résidus biomasse	Exigeant en qualification de l'opérateur Nécessite beaucoup de main-d'oeuvre Charbon de qualité variable et sali par la couverture Sensible aux aléas climatiques Rendement énergétique faible Pollution importante (fumée)
Fosse	Investissement très faible Matériaux locaux Carbonise les gros bois sans refente Capacité ajustable Conduite aisée Charbon relativement propre Débardage sur petit périmètre	Sensible aux aléas climatiques Exige un sol profond et cohérent Beaucoup de main d'oeuvre Qualification de l'opérateur Rendement énergétique faible Pollution importante (fumée)
Fours en maçonnerie	Matériaux locaux Bonne isolation thermique Conduite aisée Charbon homogène et propre Longue durée de vie Peu sensible aux aléas climatiques	Construction nécessitant un maçon compétent Installation fixe Frais de débardage Capacité déterminée Refroidissement lent Refente des gros bois Perte biomasse petits bois Pollution importante (fumée)
Fours métalliques	Mobilité Cycle court par refroidissement rapide Charbon homogène et propre Conduite aisée Peu sensible aux intempéries Débardage sur petit périmètre	Investissement lourd en devises Capacité déterminée Refente des gros bois Durée de vie courte (suivant opérateur et qualité des matériaux) Rendement énergétique moyen Pollution importante (fumée)
Fours industriels continus	Qualité ajustable et homogène Rendement élevé Automatisation Rendement énergétique élevé Pollution faible à nulle	Investissement considérable en devises Technicité élevée Périmètre d'approvisionnement Transport du bois Refente et préparation du bois

même dans les pays industrialisés (fours métalliques Mark V, four en brique Missouri), a incité les décideurs de l'aide au développement à promouvoir des projets d'implantation de fours améliorés dans les pays en développement les moins avancés. Ceci se fonde, nous l'avons dit, sur le triple objectif d'accroître l'efficacité de transformation du bois en charbon, d'améliorer le niveau technologique du monde rural et d'augmenter le potentiel économique de ce milieu. Qu'en est-il en pratique ?

Ainsi que nous l'avons examiné ci-dessus, l'efficacité d'une technique se mesure à l'aide de deux paramètres essentiellement : le rendement et la teneur en carbone fixe. La formule de rendement la plus communément utilisée est le rendement massique mais il est préférable d'utiliser des

rendements combinant teneur en carbone fixe et rendement massique, comme le rendement énergétique. Malheureusement, les études de systèmes de carbonisation menées sur le terrain, généralement dans les zones isolées, ne donnent bien souvent aucune indication quant à la teneur en carbone fixe. Nous ne pouvons qu'insister une fois encore sur la nécessité de prélever des échantillons de charbon de bois (et de bois) et d'en réaliser l'analyse compositionnelle.

Néanmoins, l'analyse des **tableaux 2** et **4** se révèle instructive. Les rendements massiques constatés sur meule de carbonisation varient entre 12 et 35 %, les plus fréquemment rencontrés se situant entre 20 et 30 %. Ces chiffres diffèrent de données souvent citées, évaluant le rendement massique des meules à 15 % ou moins (FAO,

Tableau 4. Résultats d'essais de carbonisation par des techniques améliorées — *Results gained with improved carbonization methods.*

Technique	Type	Pays	Source	Volume (stères)	Humidité du bois (% M_{ba})	RM_{ba} (% M_{ba})	TC (% M_{ca})	Durée (heures)
Fosse	Subri	Burundi	(1)	6	—	21,9	—	48
	Subri	Sénégal	(2)	2,5	31,3–56,5	29,7–35,8	75,1–77,2	10–16
	Subri	Ghana	(3)	6,5	59	25,7	—	44,5
Fours en briques	h.b.	Philippines	(4)	17	4,0	31	79,5	—
	h.b.	France	(5)	3–4	17,6–19,0	22,3–29,7	58,3–72,8	52–69
	h.a.	Zaire	(6)	8	22–25	28–32	—	90
	h.a.	Zaire	(7)	7–8	20–29	13,3	—	75
	h.a.	Kenya et Somalie	(8)	12,5	18	28	—	48
	c.c.	Zaire	(7)	33	25–30	19,6	—	125
Fours métalliques	Mark V	Zaire	(6)	7	22–25	21–32	—	50
	Mark V	Royaume-Uni	(9)	7	27,6–38,0	20,1–22,2	84,1–88,6	21–34
	Mark V	France	(5)	3–4	18,3–22,0	19,9–29,4	61,8–69,5	20–29
	Mark V	Zaire	(7)	7	20–29	12,2	66,1	48
	rectang.	France	(5)	3–4	12,4–28,2	24,6–29,7	64,2–70,4	26–45

h.b. = hémisphérique brésilien ; h.a. = hémisphérique argentin ; c.c. = cylindrique canadien (FAO, 1983) ; rectang. = rectangulaire ; M_{ba} = masse de bois initiale anhydre ; RM_{ba} = rendement massique ; TC = teneur en carbone fixe ; M_{ca} = masse anhydre du charbon de bois.

(1) Ramilison, 1990. (2) Bertaux, Vanwijnsberghe, 1990. (3) Lejeune, 1981. (4) Philippines Council for Agriculture and Resources Research and Development, 1985. (5) Briane, Haberman, 1984. (6) Lem'nd Laroo, 1989. (7) Schenkel, 1990. (8) Emrich, 1985. (9) Paddon, Harker, 1970.

1983 ; Foley, 1986, Kimaryo, 1983). De plus, les meules produisent des rendements tout à fait comparables à ceux des techniques améliorées mises en œuvre dans le même contexte humain et économique :

- fosse Subri : de 22 à 36 % ;
- fours en briques : de 13 à 32 %, mais pour une majeure partie, supérieur à 25 % ;
- fours métalliques : de 12 à 30 %, la moyenne étant comprise entre 20 et 25 %.

La grande variabilité de résultats montrée par les meules est à attribuer, selon nous, à la difficulté de conduite de cette technique : le classement du bois, la constitution de la couverture de paille et de terre doivent être réalisés avec beaucoup d'attention, de manière à assurer une bonne étanchéité au cours du processus de carbonisation ; le suivi de la carbonisation, de l'évolution du front et de l'état de la couverture doit être constant et attentif, sinon des coups de feu ou des mauvaises cuissons provoquent des pertes importantes. La préparation et la conduite d'une meule de carbonisation sont exigeants en main-d'œuvre, quantitativement et qualitativement. Ceci explique pourquoi la technique a été abandonnée dans les pays industrialisés, mais aussi pourquoi de très faibles rendements massiques peuvent être observés dans l'utilisation de la meule. La meule de carbonisation pose également le problème de la taille d'une fournée de bois à carboniser. Généralement, dans les pays en développement, les meules sont de très grandes tailles, parfois au-

dessus de 100 stères. Dans le cas où la carbonisation n'est pas bien suivie, si un coup de feu apparaît et n'est pas maîtrisé rapidement, une grande partie du bois partira en fumée, ne sera pas convertie en charbon de bois. Ceci constitue non seulement une perte significative pour le charbonnier mais aussi un impact négatif pour l'environnement.

Sur le plan qualitatif, des doutes ont été exprimés quant à la capacité de la technique de la meule d'atteindre des températures finales de carbonisation suffisantes pour produire un charbon de bois d'une teneur minimale acceptable en carbone fixe (75 %) (Emrich, 1985).

Remarquons tout d'abord qu'un charbon dont la qualité correspond à une teneur en carbone fixe de 75 % n'est pas nécessairement recherché par les consommateurs domestiques dans les pays en développement ; en effet, ceux-ci préfèrent bien souvent un charbon d'une teneur en matières volatiles élevée, afin qu'il s'allume facilement et qu'il soit dense (l'achat se fait au volume). Néanmoins, les quelques résultats donnés au **tableau 2** montrent qu'il est tout à fait possible d'obtenir avec la technique de la meule un charbon d'une teneur en carbone fixe supérieure à 75 %. De plus, ce charbon de bois de qualité est obtenu à des rendements massiques d'un excellent niveau, puisque compris entre 25 et 30 %.

Afin de mieux nuancer notre comparaison, reprenons les résultats du **tableau 5**, où le rendement énergétique combine qualité du charbon de bois (teneur en carbone fixe

Tableau 5. Rendement énergétique pour différentes méthodes de carbonisation — *Energy yield of different carbonization methods.*

Techniques	Type	Pays	Bois utilisé	RM_{ba} (% M_{ba})	TC (% M_{ca})	PCS_{ba} (kJ · kg ⁻¹)	PCS_{ca} (kJ · kg ⁻¹)	RE' (%)
Améliorées								
Fosse	Subri	Sénégal	(1) <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	32,8	76,6	19 737 (8)	31 378	52,15
Four en briques	h.b.	Philippines	(2) Mélange	31	79,5	18 768–20 855 (9)	31 709	47,13–52,38
	h.b.	France	(3) Chêne	26,0	65,6	18 768 (3)	30 032	41,60
Four métallique	Mark V	UK	(4) Chêne	21,2	86,4	20 855 (4)	32 464	33,00
	Mark V	France	(3) Chêne	24,7	65,7	18 768 (3)	30 045	39,54
	Mark V	Zaïre	(5) <i>Acacia auriculiformis</i>	12,2	66,1	19 590 (5)	30 096	18,74
	rectang.	France	(3) Chêne	27,2	67,3	18 768 (3)	30 250	43,84
Meules								
	tradit.	Zaïre	(5) <i>Acacia auriculiformis</i>	23,4	78,0	19 590 (5)	31 539	37,67
	tradit.	France	(3) Chêne	31,5	75,4	18 768 (3)	31 238	52,43
	tradit.	Cuba	(6) <i>Eucalyptus pellita</i>	25,7	86,0	19 877 (6)	32 422	41,92
	tradit.	Zambie	(7) <i>Brachystegia</i> sp.	24,3	68,4	20 490 (8)	30 389	36,04

Les valeurs de rendement massique et de teneur en carbone fixe sont les moyennes des couples de valeurs données aux tableaux 2 et 4.

RM_{ba} = rendement massique ; M_{ba} = masse de bois initiale anhydre ; TC = teneur en carbone fixe ; M_{ca} = masse anhydre du charbon de bois ; PCS_{ba} = pouvoir calorifique supérieur du bois anhydre ; PCS_{ca} = pouvoir calorifique supérieur du charbon de bois anhydre ; RE' = rendement énergétique supérieur de carbonisation ; h.b. = hémisphérique brésilien.

Source : (1) Bertaux, Vanwijnsberghe, 1990. (2) Philippines Council for Agriculture and Resources Research and Development, 1985. (3) Briane, Haberman, 1984. (4) Paddon, Harker, 1979. (5) Schenkel, 1990. (6) Quivy, 1992. (7) Hibajene, 1994. (8) Doat, 1977. (9) Le PCS n'étant pas disponible pour cette référence, nous avons repris les deux extrêmes de la liste des PCS donnés dans ce tableau.

– pouvoir calorifique) et rendement massique de carbonisation.

Le rendement énergétique varie de 18,7 à 43,8 % et de 36,0 à 52,4 % pour les techniques améliorées et pour les meules respectivement. Ceci confirme que la carbonisation en meule peut donner des résultats comparables aux techniques améliorées aussi bien sur le plan qualitatif que sur le plan quantitatif, pour autant que le processus soit bien mené et contrôlé. Ceci impose un savoir-faire certain du charbonnier qui est le facteur-clé du succès d'une carbonisation en meule.

Par leur statisme, les fours en maçonnerie exigent souvent l'achat d'un matériel de manutention qui peut freiner leur développement. Les fours métalliques quant à eux nécessitent des investissements importants que bien souvent le charbonnier ne peut se permettre, et ont une durée de vie très réduite sous les climats tropicaux et équatoriaux. Ces fours sont cependant beaucoup plus faciles à conduire que les meules ou les fosses. Les rendements de carbonisation ainsi que la qualité du charbon de bois obtenu sont donc en principe plus aisément maximisés, pour autant que les charbonniers maîtrisent bien la conduite de ces fours.

Dans les conditions socio-économiques des pays en développement, il ressort que la technique de la meule, par son faible investissement, sa grande mobilité et sa souplesse quant au matériau utilisé apparaît mieux adaptée aux conditions locales. Le charbonnier des pays en développement ne dispose que de peu de ressources financières. Sa capacité d'investissement est donc très limitée à la fois au niveau financier s'il doit acheter la coupe de bois, et plus déterminant encore, au niveau de l'équipement. Son activité est généralement itinérante quand elle l'occupe à temps plein. Il doit alors acheter, aux autorités du pays, une concession lui permettant l'exploitation du site. Le cas le plus fréquent est un temps partagé entre son activité de charbonnier et de cultivateur/éleveur.

La confection d'une meule requiert une quantité importante de main-d'oeuvre, la surveillance ne nécessite pas une présence permanente, mais est longue et doit être menée avec soin. Ce facteur, de par le coût élevé de la main-d'oeuvre dans les pays industrialisés, s'il y a conduit à la disparition de cette technique, prend une autre signification dans les pays en développement où la notion de rentabilité est très différente et où les problèmes de main-d'oeuvre sont moins importants.

Une carbonisation plus efficace et plus performante ne pourra être acquise dans les pays en développement que grâce à un effort préalable de formation des charbonniers, quelle que soit la technique de carbonisation utilisée localement. Ensuite, s'il est souhaitable de développer les techniques améliorées de carbonisation, il est indispensable de mettre en place des systèmes de transfert de technologies mais surtout de soutien financier aux entreprises de manière à généraliser les quelques projets mis en place dans les pays en développement.

CONCLUSION

La meule de carbonisation est une technique qui se révèle bien adaptée au contexte socio-économique des pays en développement : elle requiert très peu d'investissement en équipements, est mobile, ne nécessite pas de débardage et est très flexible quant au volume de bois à carboniser. De plus, nous avons montré que, mise en oeuvre par des charbonniers expérimentés et consciencieux, la meule peut produire un charbon de qualité (carbone fixe de 71 à 89 % de la masse anhydre) avec des bons rendements en masse (de 20 à 35 % sur base anhydre). Cependant, ces bons résultats dépendent surtout du charbonnier : suivi de la carbonisation, expérience. Ceci explique pourquoi certains très mauvais résultats ont pu être observés, tels des rendements massiques de carbonisation inférieurs à 10 %. La meule est également exigeante en quantité de main-d'oeuvre, mais ceci n'est certainement pas un inconvénient dans les pays en développement.

Le principal avantage des techniques améliorées, tels les fours en briques ou métalliques, est leur facilité d'utilisation : ils sont plus simples à conduire, la carbonisation est plus aisément maîtrisée. Cependant, les résultats relevés sur le terrain ou dans la littérature montrent que ces techniques améliorées, utilisées dans le même contexte socio-économique, ne fournissent pas des performances de carbonisation meilleures que les meules : les rendements massiques et la qualité du charbon de bois se situent au même niveau.

Ceci confirme que des bonnes performances de carbonisation sont obtenues par des charbonniers maîtrisant bien la technique, quelle qu'elle soit. L'amélioration de la production du charbon de bois dans les pays en développement ne sera obtenue que par une formation aussi large que possible des charbonniers oeuvrant dans ces pays. Les techniques améliorées, de par leur conduite plus facile à maîtriser, doivent donner des résultats moins variables, soit un rendement de carbonisation et une qualité de charbon de bois plus constants. Néanmoins, le principal inconvénient des techniques améliorées – fours métalliques, en briques, continus – restera encore longtemps leur coût d'investissement prohibitif pour beaucoup de charbonniers des pays en développement. Seules des petites entreprises, bien structurées, seront à même de faire le saut technolo-

gique vers les systèmes de carbonisation nécessitant des investissements conséquents.

Par conséquent, sur le plan technique, des améliorations simples des méthodes traditionnelles, requérant très peu d'investissement, essentiellement en matériaux locaux, sont susceptibles d'apporter un "plus" à la production de charbon de bois par le secteur informel (petites équipes de charbonniers) dans les pays en développement.

Bibliographie

- Adam A (1990). "Étude sur la filière du charbon de bois au Burundi", pp. 1–150. Ministère de l'Énergie et des Mines ; Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) ; Programme spécial Énergie Burundi.
- Bertaux P, Vanwijnsberghe S (1990). Inventaire, aménagement sylvicole et étude de valorisation des brise-vent dans la région nord du fleuve Sénégal. Travail de fin d'études, Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux.
- Briane D, Haberman A (1984). "Essais comparatifs de six systèmes de carbonisation artisanale", pp. 1–188. Association Bois de Feu, Paris.
- Briane D, Doat J (1985). "Guide technique de la carbonisation", pp. 1–180. Edisud, Aix-en-Provence, France.
- Carré J, Hébert J, Lacrosse L (1984). "Critical analysis of energy utilization of lignous materials by dry processes. Final report", vol. 1, pp. 1–186. European Commission, Directorate General VIII.
- Doat J (1977). Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. *Bois Forêts Trop.* **172**, 33–55.
- Eimer P, Ndamana C (1987). "Carbonisation : les ratios de transformation", pp. 1–36. République du Burundi, Ministère de l'Agriculture, Département des Eaux et Forêts.
- Emrich W (1985). Experience with Argentine charcoal kilns in two East African countries. In "Proceedings of the symposium on forest products research international—achievements and the future, Pretoria, South Africa", pp. 1–13. Paper no. 12–5.
- FAO (1983). "Techniques simples de carbonisation", pp. 1–152. Document no. 41, Food and Agriculture Organization, Rome.
- Foley G (1986). "Charcoal making in developing countries", pp. 1–214. Earthscan, London.
- Girard P (1992). Analytical performance tests for charcoal-making technics and equipment. *Holz Roh- Werkst.* **50**, 479–484.
- Hibajene SH (1994). "Assessment of earth kiln charcoal production technology", pp. 1–39. Stockholm Environment Institute.
- Humphreys FR, Ironside GE (1980). "Charcoal from New South Wales species of timber". Research note no. 44, Forestry Commission of New South Wales.
- Kimario BT (1983). Yield and quality of charcoal from lesser-known tree species in Tanzania. In "Wood energy in East Africa". IDRC, Ottawa. [Cited by Foley, 1986].
- Lejeune J (1981). "Charcoal production in semi-mobile kilns at Subri River forest reserve", pp. 1–40. Report no. GHA/74/103, United Nations Development Program ; Food and Agriculture Organization.

- Lem'nd Laroo K (1989). "Étude de rendement du four en maçonnerie 'Rabo-Quente' et du four métallique 'Mark V' au centre forestier de Kinzono", pp. 1–17. Centre d'Adaptation des Techniques Énergie–Bois, Zaïre.
- Lusadisu L (1989). "Étude comparative des performances des meules traditionnelles zaïroises et casamançaises", pp. 1–29. Centre d'Adaptation des Techniques Énergie–Bois, Zaïre.
- Paddon AR, Harker AP (1979). "The production of charcoal in a portable metal kiln", pp. 1–28. Document no. G119, Tropical Products Institute, London.
- Philippines Council for Agriculture and Resources Research and Development (1985). "The Philippines recommends for fuelwood and charcoal utilization", pp. 1–95. Technical bulletin series no. 56, Philippines Council for Agriculture and Resources Research and Development.
- Quivy V (1992). Méthodologie de gestion et de valorisation par carbonisation des plantations d'*Eucalyptus pellita* Muell.
- Y. Schenkel, P. Bertaux, S. Vanwijnsberghe, J. Carré
- Travail de fin d'études, Faculté des Sciences agronomiques de Gembloux.
- Ramilison C (1990). "Assistance de la société 'FANALAMANGA' au Département des Eaux et Forêts du Burundi en matière de carbonisation. Rapport", pp. 1–31.
- Robinson AP (1988). Techniques de carbonisation en Somalie dans la région de Bay. *Unasylya* 40 (159), 42–49.
- Schenkel Y (1990). "Essais d'accompagnement des Bateke. Expérimentation de carbonisation par le secteur privé. Note de synthèse des premiers résultats", pp. 1–12. Centre de Recherches agronomiques ; Zaïre Trading and Engineering.
- Schenkel Y (1991). "Essais d'accompagnement des Bateke. Expérimentation de carbonisation par le secteur privé. Rapport", pp. 1–10. Centre de Recherches agronomiques ; Zaïre Trading and Engineering.

(24 réf.)