

CARRET

REPUBLIQUE DU SENEGAL

MINISTERE DU DEVELOPPEMENT RURAL

INSTITUT SENEGALAIS
DE RECHERCHES AGRICOLES

DEPARTEMENT DES RECHERCHES
SUR LES PRODUCTIONS FORESTIERES

F0000095

11/01/86
10h30

CARBONISATION DU BOIS ET DE LA TOURBE
EN FOUR METALLIQUE TRANSPORTABLE
- Analyse du produit: final-

par

Babou NDOUR
Physico-chimiste du bois

MEMOIRE DE CONFIRMATION DE CHERCHEUR A L'ISRA

JANVIER 1986

CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES FORESTIERES

Dakar

| | Page |
|--|------|
| AVANT-PROPOS | 1 |
| INTRODUCTION | 2 |
| <u>Chapitre 1</u> : LES CARACTERISTIQUES DE LA MATIERE PREMIERE | |
| 1 - <u>Le bois</u> | 5 |
| 11 - Les caractéristiques anatomiques et physico-chimiques du bois | 5 |
| 11.1 - Les caractéristiques anatomiques | 5 |
| 11.11 - Au point de vue macroscopique | 5 |
| 11.12 - Au point de vue microscopique | 5 |
| 11.2 - Les caractéristiques chimiques | 6 |
| 11.21 - Composition | 6 |
| 11.22 - Constitution | 6 |
| 11.23 - Les autres composés | 7 |
| 11.3 - Les caractéristiques physiques | 8 |
| 11.31 - La densité | 9 |
| 11.32 - L'humidité | 9 |
| 11.33 - Le pouvoir calorifique | 11 |
| 2 - <u>La Tourbe</u> | 17 |
| 21 - Nature et mode de formation de la tourbe | 17 |
| 22 - Les caractéristiques physico-chimiques de la tourbe | 18 |
| <u>Chapitre 2</u> : LACARBONISATION | |
| 1 - Les différentes étapes de la carbonisation | 21 |
| 11 - La combustion | 21 |
| 12 - La déshydratation | 25 |
| 13 - La distillation (carbonisation) | 25 |
| 14 - Le refroidissement | 25 |
| 2 - Les mécanismes chimiques de la carbonisation | 26 |
| 3 - Les facteurs agissant sur la carbonisation | 27 |
| 31 - La température | 27 |
| 32 - La durée de carbonisation et le gradient de température | 28 |
| 33 - La matière première | 28 |
| 33.1 - L'essence | 28 |
| 33.2 - La teneur en humidité | 29 |
| 33.3 - Les dimensions des bois | 29 |
| 34 - Le type d'installation et la qualification de l'opérateur | 30 |

| | |
|---|----|
| 4 - Notions de rendement | 30 |
| 5 - Nature et propriétés du charbon de bois | 31 |
| 51 - Les propriétés physiques du charbon de bois | 31 |
| 51.1 - La reprise d'humidité ou stabilité | 32 |
| 51.2 - La friabilité | 32 |
| 52 - Les propriétés chimiques du charbon de bois | 32 |
| 52.1 - Les matières volatiles | 32 |
| 52.2 - La teneur en carbone pur (carbone fixe) | 33 |
| 52.3 - Le pouvoir calorifique | 33 |
| 52.4 - Les teneurs en cendres | 34 |
| <u>Chapitre 3 : ETUDE EXPERIMENTALE</u> | |
| 1 - Matériel et méthode | 36 |
| 11 - Matériel | 36 |
| 11.1 - Description du four | 36 |
| 12 - Méthode | 38 |
| 12.1 - Le conditionnement du bois | 38 |
| 12.2 - Le chargement du four | 38 |
| 12.3 - L'allumage | 39 |
| 12.4 - Suivi de la carbonisation | 39 |
| 12.5 - Le refroidissement | 41 |
| 12.6 - Le défournement et la mise en sac: | 42 |
| 13 - Résultats et interprétations | 45 |
| 13.1 - Résultats | 45 |
| 13.2 - Interprétations des résultats | 63 |
| 13.21 - Rendement pondéral sur matière anhydre et rendement énergétique à la carbonisation | 63 |
| 13.22 - Caractéristiques physico-chimiques du produit final | 64 |
| 13.23 - Analyses économiques | 65 |
| 13.24 - Evolution de la température en fonction du temps | 66 |
| <u>Chapitre 4 : CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE</u> | |
| 1 - Conclusions générales | 69 |
| 2 - Perspectives de recherche | 71 |
| LISTE BIBLIOGRAPHIQUES | |
| ANNEXES. | |

- AVANT-PROPOS -

Le bois combustible est utilisé au Sénégal sous deux formes :

- bois de feu le plus souvent dans des "foyers trois pierres" en zone rurale ;
- charbon de bois dans des foyers malgaches en ville et même dans les campagnes.

La transformation du bois en charbon s'accompagne d'une très grande perte d'énergie, ce qui laisse penser qu'il ne convient pas toujours de carboniser le bois. Mais, ce qui compte finalement, c'est le rendement total, de la récolte du bois à la combustion du charbon, par rapport au rendement du bois directement brûlé. Entre le bois et le charbon, il faut alors choisir celui qui donne le plus de chaleur par unité de volume ou de poids.

Il faut, en général, six à sept tonnes de bois partiellement vert pour obtenir une tonne de charbon livrable. On a calculé qu'en brûlant environ 23 kg de bois partiellement vert à ciel ouvert, on obtenait la même quantité de chaleur qu'en brûlant 1 kg de charbon de bois dans un fourneau bien conçu (7) ; or la carbonisation de 23 kg de bois donne 3 kg de charbon. Dans ce cas, il est trois fois plus rentable de carboniser le bois que de le brûler directement.

D'un autre côté, si on sèche le bois et qu'on le brûle dans un fourneau bien conçu efficace à 15%, on obtient le rendement thermique qu'avec une même quantité de charbon (7) mis, contrairement au bois, le charbon peut brûler sans fumée ni flamme. Il est moins encombrant, plus facile à conserver parce que non attaqué par les insectes et les champignons, plus maniable. Ces qualités font que le charbon est mieux indiqué que le bois à être brûlé dans les appartements des villes. Il reste et restera encore le combustible de choix des citadins, à moins qu'ils puissent obtenir du pétrole, du gaz ou de l'électricité à bon marché.

Lorsque le bois est produit sur place, il est préférable de le brûler que de le carboniser. Mais lorsqu'il doit être transporté sur des distances assez longues (supérieures ou égales à 80 km), il est concurrencé par le charbon dont le transport est meilleur marché par unité énergétique.

Dans le cas de la tourbe, le problème ne se pose pas étant donné qu'à l'état naturel, elle n'est pas directement mobilisable par les ruraux et sa combustion à l'état brut dégage une quantité très importante de fumées et de matières volatiles.

Compte tenu des multiples avantages que procure le charbon et son impact sur la déforestation, il nous a paru nécessaire de mener des recherches sur les méthodes de transformation et de valorisation du bois et de la tourbe, parallèlement à celles entreprises par le CERER sur la combustion.

- INTRODUCTION -

Dans les pays en développement, la consommation d'énergie d'origine ligneuse représente 75 % en moyenne de l'énergie totale consommée, plus de 80 à 90 % de cette énergie ligneuse est utilisée par les ménages pour la cuisson des aliments.

Au Sénégal plus particulièrement, la consommation totale de combustible ligneux est estimée à 4.6 millions de m³ équivalent rondin soit 1,3 millions de tonnes équivalent pétrole. L'utilisation du bois occasionne alors, chaque année, un déboisement de 50 000 hectares de forêt naturelle.

Devant cette situation de plus en plus alarmante du fait de l'augmentation de la population (2,8 ‰ par an) et de l'accroissement de l'urbanisation, un certain nombre d'actions de recherches est mené : recherches sylvicoles au CNRF/ISRA, recherches sur les économies d'énergie au CERER et recherches sur les possibilités de substituer une partie du bois combustible par le tourbe (CTS/CNRF/CERER). Il se trouve, cependant, que l'utilisation domestique de la tourbe brute pose un certain nombre de contraintes : dégagement assez important de fumées, de matières volatiles et de cendres. Il s'est avéré utile ainsi de la carboniser avant la combustion.

Les premières expériences de carbonisation ont d'abord fait appel aux méthodes traditionnelles : meule traditionnelle et meule casamançaise. Les résultats ont été peu satisfaisants quant au rendement en charbon, au temps de carbonisation extrêmement long et au prix de revient technique du kilogramme de charbon de tourbe.

Dans le cadre du mémoire de confirmation de chercheur de l'ISRA et à la demande de la Compagnie des Tourbières du Sénégal, nous nous sommes proposés d'expérimenter une technique de carbonisation peu connue au Sénégal, bien qu'ancienne en Europe : à savoir le four métallique transportable.

Le but de l'étude est d'évaluer, d'une part, les performances du four par rapport aux méthodes traditionnelles quant aux rendements matière et énergétique et, d'autre part, de déterminer les avantages socio-économiques de la dite méthode. Le suivi de l'évolution de la température en fonction du temps nous renseignera sur les mécanismes thermo-chimiques de la carbonisation.

Le rapport se scinde en deux grandes parties :

- une partie bibliographique où nous traiterons des caractéristiques physico-chimiques de la matière première (bois et tourbe) et des paramètres de la carbonisation ;
- une étude expérimentale comportant la description du four, les aspects techniques et économiques, les résultats commentés suivis de leur interprétation ;

Chapitre 1

LES CARACTERISTIQUES DE LA MATIERE PREMIERE

I - LE B O I S

11 - Les caractéristiques anatomiques et Physico-chimiques du bois

11.1 - LES CARACTÉRISTIQUES ANATOMIQUES

11.11 - Au point de vue macroscopique

Une observation macroscopique de la coupe transversale d'un tronc ou d'une branche permet de distinguer, de l'extérieur vers l'intérieur, l'écorce, le liber (partie très fine) ou phloème puis le bois proprement dit ou xylème. Entre le xylème et le phloème se trouve la fine couche du Cambium. Le xylème lui-même se subdivise en aubier puis bois de coeur plus foncé au centre (Fig. 1). L'écorce (partie morte) assure la protection de l'arbre alors que le liber, le cambium et l'aubier forment la partie vivante.

Les cellules cambiales, par division, ajoutent chaque année une épaisseur de matériau ligneux. L'aubier assure la conduction de l'eau depuis la racine jusqu'à la cime et le liber, en sens inverse, assure la conduction de la sève élaborée. Le bois de coeur est une zone morte dans laquelle s'accumulent des produits de conservation qui assurent la protection contre les parasites animaux et végétaux.

On distingue également, en coupe transversale, une alternance de zones sombres et de zones claires appelées cernes. En zone tempérée, les cernes sont annuels alors qu'en zone tropicale ils sont moins nets et dépendent des saisons.

11.12 - Au point de vue microscopique

La masse ligneuse des résineux (gymnospermes) est constituée, à 90 ou 95 %, d'une seule sorte de cellules, la trachéide. Ces cellules allongées dans le sens longitudinal peuvent mesurer plusieurs millimètres de long (3 mm en moyenne). Les feuillus ou angiospermes sont constitués par un nombre de cellules plus varié (fibres, vaisseaux, parenchyme, rayons, etc.) (Fig.2). Les fibres de feuillus sont en général plus courtes (1 mm en moyenne).

Notons, enfin, que l'ultrastructure d'une fibre de bois montre, de l'extérieur vers l'intérieur, trois types de couches (Fig. 3) : la lamelle moyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire plus importante formée elle-même de trois couches (S1, S2, S3). Il peut même exister, dans certains cas, une quatrième couche plus profonde appelée couche G ou W généralement gélatineuse.

11.2 ■ LES CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

Pour comprendre et interpréter les réactions mises en jeu dans les procédés thermiques de valorisation énergétique du bois, il est nécessaire d'avoir une idée de sa composition et de sa structure chimique.

11.21 ■ Composition

Le bois est un matériau dont la composition chimique varie très peu suivant l'espèce. Aussi, on admet que le bois anhydre contient en masse

- 49 à 50 % de carbone,
- 6 % d'hydrogène,
- 43 à 44 % d'oxygène,
- 0,2 à 0,5 % d'azote.

Toutefois, selon la nature de l'essence ou le lieu de récolte, les bois ont des teneurs variables en matières minérales (calcium, magnésium, sodium, potassium, fer, silice, phosphore, soufre, etc.). Certains auteurs, admettant les chiffres moyens de 50 % de carbone, 6 % d'hydrogène, ont donné, comme formule brute approximative du bois, ramenée à un atome-gramme de carbone, $C_{1,44}O_{0,66}$, soit 24 g pour la molécule de bois anhydre.

11.22 ■ Constitution

Le bois est un mélange de trois types de polymères naturels : cellulose, lignines et hémicellulose dans les proportions approximatives de 50 % ; 25 % et 25 % en fonction de l'espèce et des variations écobiologiques telles que différences génétiques intraspécifiques et conditions de croissance (peuplement, nature du sol). La cellulose et les hémicelluloses sont des polymères d'hydrate

de carbone formés à partir de molécules monosaccharidiques ou oses (sucres simples). La lignine est un polymère de phénylpropanes substitués.

La cellulose est le polymère le plus abondant dans le bois (et les végétaux en général). La molécule de cellulose est un polymère de glucopyranose ; chaque chaîne linéaire élémentaire, contenant environ 200 molécules monomères liées en 1-4, est associée à d'autres chaînes pour former des microfibrilles ou fibrilles élémentaires. Le degré de polymérisation de la cellulose peut se situer entre 1000 et 3000 unités de glucose (Fig. 4).

Les hémicelluloses participent, comme la cellulose, à l'édifice de la paroi du bois. Ce sont des molécules constituées par des polysides à courtes chaînes ramifiées formées de pentoses (arabanes, xylanes), d'hexoses (mananes, galactanes) et d'acides uroniques ac. glucuronique, galacturonique) (Fig. 5 et 6) (11).

Si la structure de la cellulose est la même dans les différentes espèces, par contre les hémicelluloses varient considérablement selon l'essence et, notamment, entre feuillus et résineux. Les hémicelluloses des feuillus sont généralement riches en pentoses, tandis que celles des résineux contiennent d'avantage d'hexoses.

La lignine (ou plutôt les lignines) est un polymère polyphénolique tridimensionnel incrustant les polysaccharides. Les monomères constitutifs de la lignine sont des alcools p-coumarylique, coniférylique et sinapylique ou les aldéhydes correspondants. Ces monomères sont associés de façon complexe et encore mal définie. FREUDENBERG a proposé la formule globale de la lignine de conifère (Fig. 6).

11.23 - Les autres composés

Outre les polymères constituant la paroi cellulaire, les bois des différentes essences contiennent, en quantités variables, diverses substances de faible poids moléculaire appelées collectivement matières extractibles.

Ces substances comprennent : les terpènes, les graisses et les cires, les composés phénoliques, les alcaloïdes et les matières minérales.

- . les terpènes sont présents en grande quantité dans les résines, les huiles essentielles ;
- . les graisses sont des esters d'acide gras et de glycérol. Les acides gras peuvent être saturés, mono, di ou triéniques ;
- . les cires sont des esters d'acides gras et d'alcools gras (alcool en C_{16} et C_{28})
- . les composés phénoliques : les phénols simples regroupent les aldéhydes et les acides benzoliques et cinnamiques libres ou estérifiés. Quelques quinones sont aussi signalées. Elles peuvent être parfois responsables de la toxicité de certains bois. Les tanins étant des composés phénoliques faisant précipiter les protéines, représentent le groupe le plus important. Il existe deux types de tanins : les tanins hydrolysables, esters d'acides galliques (et ses dérivés) avec un monosaccharide, souvent le glucose et les tanins condensés, polymères de flavanol ou diol . Les tanins sont utilisés en tannerie et dans l'industrie des colles ;
- . les matières minérales constituent les cendres. Les bois tropicaux peuvent contenir jusqu'à 7 % de cendres. Toutefois, la majorité d'entre eux n'en contient que 0,5 à 2,5 %. Beaucoup de ces matières minérales sont essentielles à la croissance de l'arbre. Leur répartition est liée à l'écologie de l'individu mais aussi à l'organe considéré. On en trouve beaucoup dans les feuilles et les écorces et moins dans le tronc. Il s'agit des Ca, K, Mg, Mn, Na, P, Cl et 50 autres oligoéléments.

La silice représente cependant une importance considérable en raison des inconvénients qu'elle peut apporter dans la technologie des bois (sciage, mise en copeaux, chaudière).

11.3 - LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Le bois est un combustible dont les qualités énergétiques sont largement influencées par un certain nombre de ses propriétés physiques, notamment la densité, l'humidité et le pouvoir calorifique.

11.31 - La densité

Par définition, la densité d'un corps est le rapport de sa masse à celui d'un égal volume d'eau ou d'air, suivant qu'il s'agit d'un solide d'un liquide ou d'un gaz. Certains auteurs utilisent le terme de densité à la place de la masse volumique (ou masse spécifique) qui est le rapport de la masse par le volume. Nous adopterons, dans notre étude, la dernière définition. Ainsi, la détermination de la densité posera un certain nombre de problèmes du fait que le bois est un matériau poreux, hétérogène par la présence des cernes, hygroscopique.

Pour palier à ces contraintes, les techniciens du bois définissent plusieurs types de densité :

▪ *les densités apparentes*

. la densité anhydre qui correspond à la masse anhydre/volume anhydre

. la densité sèche à l'air qui correspond au rapport de la masse par le volume à l'humidité considérée ;

. la densité basale égale à la masse anhydre/volume saturé d'eau (on l'appelle également l'infradensité). Cette densité minimale donne plus de renseignements sur la matériau bois quand on sait qu'elle donne une idée sur la quantité de matière sèche contenue dans le bois ;

▪ *la densité intrinsèque* qui correspond à la masse spécifique du matériau ligneux (paroi de la fibre). Cette densité vraie peut être déterminée à l'hélium. Elle est toujours la même et égale à $1,53 \text{ g/cm}^3$ pour les bois siliceux..

La densité des bois tropicaux varie dans une large fourchette allant de 0,1 et 0,2 pour le Balsa, le Parasolier. et le Cécropia à 1,2 et 1,3 pour le Licana et le Coula.

11.32 - L'humidité

Le bois est un matériau très hygroscopique. La quantité d'eau retenue par le bois, à l'état d'équilibre, dépend de l'humidité de l'air ambiant,

de la température et de la pression atmosphérique. Certains auteurs indiquent que, lorsque l'humidité de l'air est de 100 %, l'humidité dans le bois s'équilibre autour de 30 % sur brut.

L'eau est différemment localisée à l'intérieur du bois. On trouve en effet de l'eau dans les vides cellulaires (eau libre), de l'eau de saturation située dans les membranes cellulaires (eau de saturation) et de l'eau qui entre dans la constitution intime des molécules du bois (eau de constitution).

Lorsqu'on chauffe le bois, c'est d'abord l'eau libre qui est éliminée (on dit que le bois a atteint son taux de saturation). L'eau de constitution n'est éliminée qu'après destruction totale du bois.

Comme pour la densité, on définira plusieurs types d'humidité :

- humidité en % de la masse brute

$$E = \frac{Mh - Mo}{Mh} \times 100$$

ou Mh = masse de l'échantillon à étudier

Mo = masse de l'échantillon anhydre après dessiccation à 105°C jusqu'à poids constant.

- humidité en % de la masse anhydre

$$H \% = \frac{Mh - Mo}{Mo} \times 100$$

- on emploie également le terme de siccité qui correspond au pourcentage de matière sèche par rapport à la matière brute

$$Siccité S \% = \frac{Mo}{Mh} \times 100$$

Ces notions d'humidité, extrêmement importantes, donnent une idée précise sur le rendement de carbonisation. De ce fait, avant toute carbonisation, il est nécessaire de connaître la masse anhydre de la matière première.

Notons, enfin, que l'humidité varie à l'intérieur du bois. L'aubier contient beaucoup plus d'eau (40 à 60 %) que le bois de coeur (20 à 25 %) sur brut.

11.33 - Le pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est, par définition, la quantité de chaleur dégagée par la combustion de l'unité de poids de ce corps. Le pouvoir calorifique s'exprime en joules par kg (ou en Kcal/kg). Le pouvoir calorifique est dit pouvoir calorifique supérieur (*pcs*) lorsque l'eau formée au cours de la combustion est condensée (récupération de la chaleur latente de condensation). Ces conditions sont celles des mesures de la bombe calorimétrique (combustion à volume constant). Le pouvoir calorifique est dit pouvoir calorifique inférieur (*pci*) lorsque 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 d'une utilisation pratique du bois et du charbon de bois.

Le *pci* se déduit par le calcul du *pcs* en connaissant le nombre de molécules d'eau formées et la chaleur de l'eau engagée par le passage de l'état vapeur à l'état liquide à la température initiale. On admet généralement pour du bois la formule générale approchée suivante :

$$pci = pcs - 2508 \times h \text{ en KJ/kg}$$

h étant le % pondéral d'hydrogène dans le bois

2508 KJ/kg, la valeur de la chaleur latente de condensation de l'eau à 0°C.

Pour 6 % d'hydrogène (teneur moyenne dans le bois), nous avons donc

$$pci = pcs - 1354 \text{ en KJ/kg}$$

Le *pci* d'un corps varie dans de larges proportions suivant son degré d'humidité. La quantité de chaleur diminue quand la teneur en eau du bois augmente.

En fonction de l'humidité considérée, on définira plusieurs types de pouvoir calorifique inférieur :

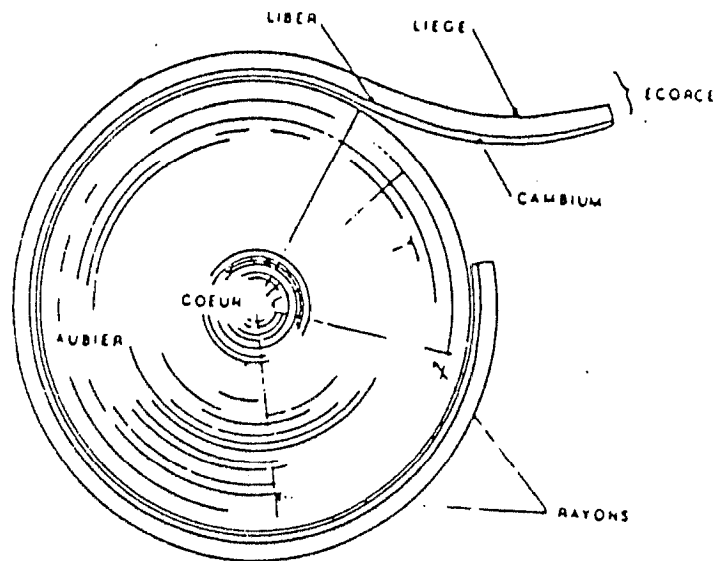


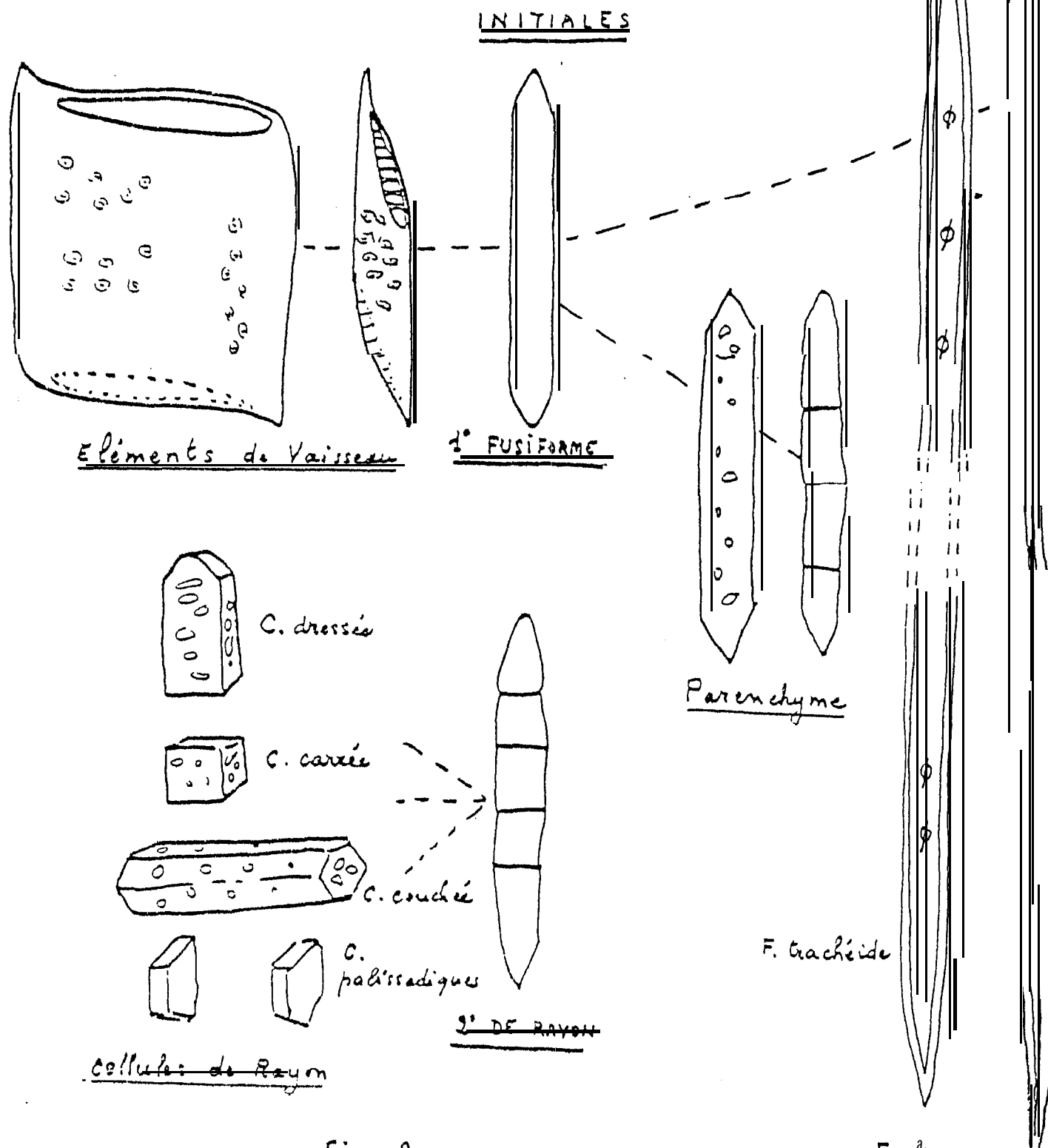
FIGURE 1 SECTION TRANSVERSALE DU TRONC D'UN FEUILLU

LES INITIALES DU CAMBIUM

ET LEURS DÉRIVÉES

(dans un bois de feuillu)

Fibres



Fia 9)

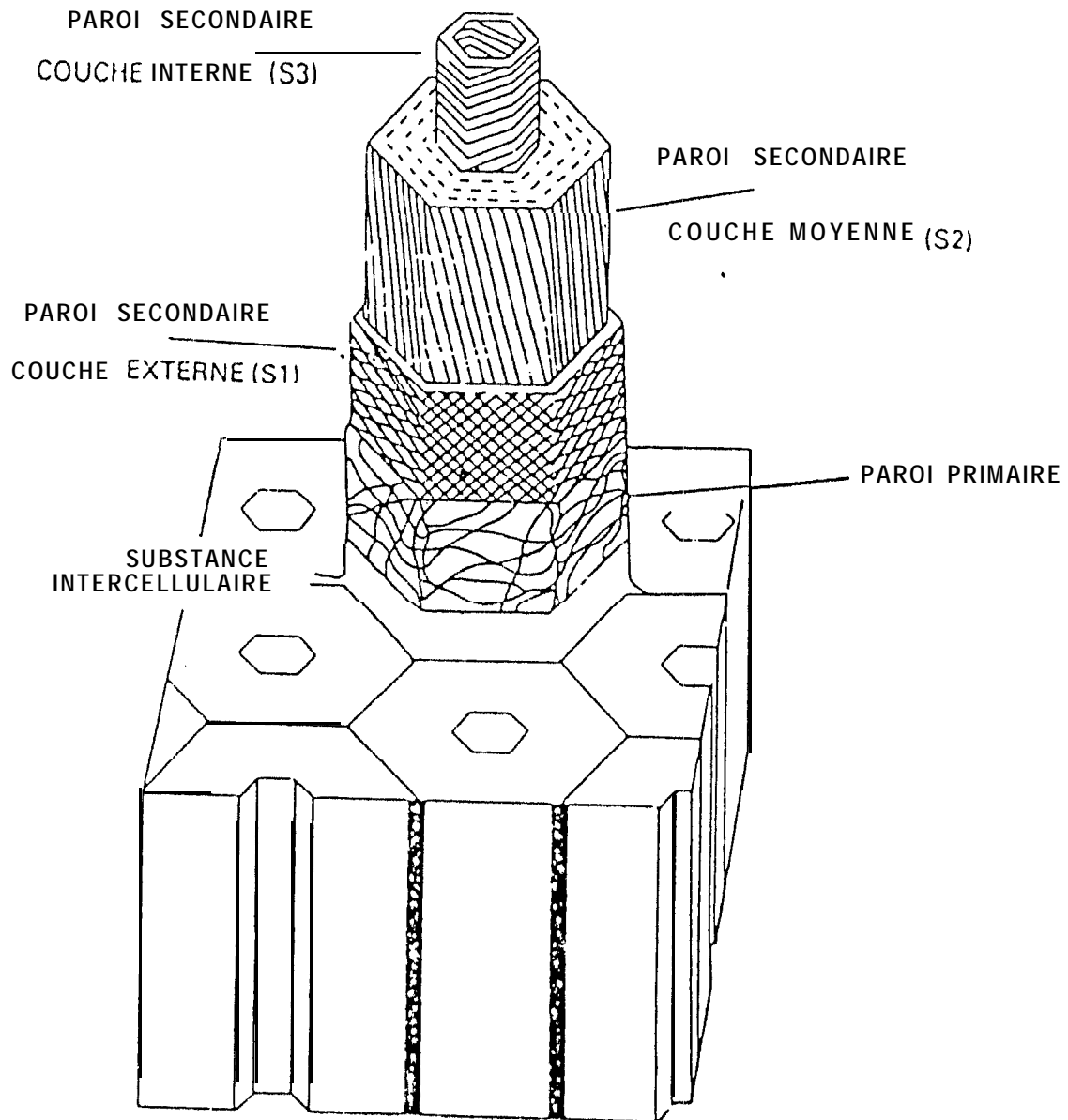


Figure 3 . Schéma de la structure d'une fibre de bois.

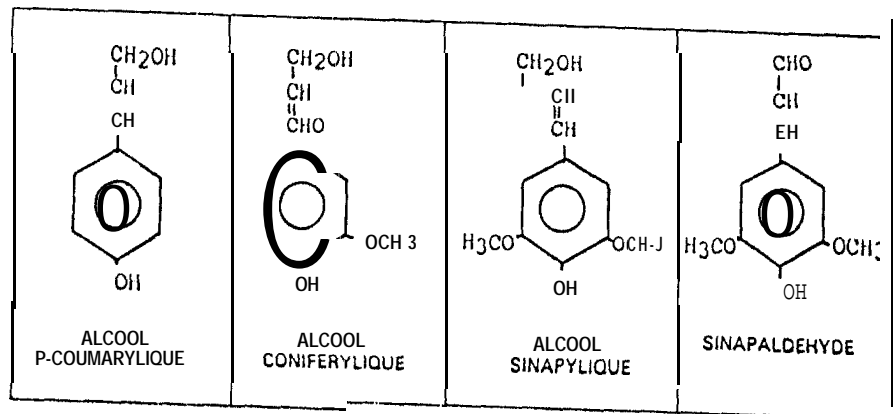


Figure 7 : Représentation des monomères.

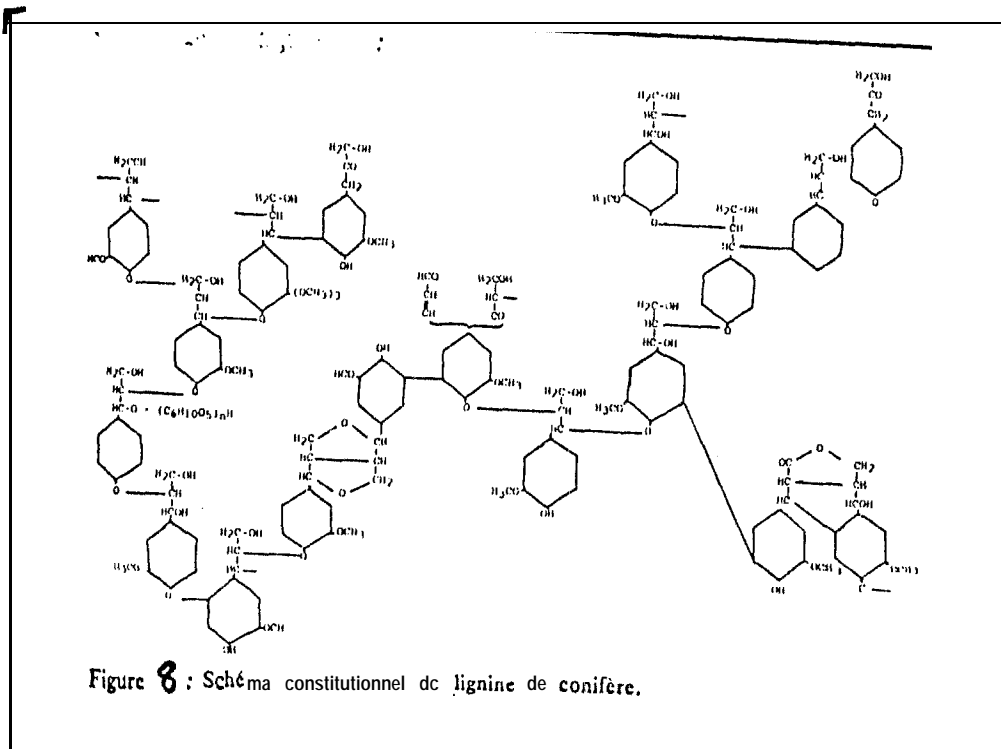


Figure 8 : Schéma constitutionnel de lignine de conifère.

- si E = humidité du bois sur brut

$$Pe = Po \times \frac{100 - E}{100} - 25,08 \times E \text{ en KJ/kg}$$

avec $Pe = pci$ à humidité, E (KJ/kg)

$Po = pci$ sur bois anhydre (KJ/kg)

- si H = humidité du bois en pourcentage du poids sec

$$Ph = \frac{Po - 25,08 \times H}{100 + H} \times 100$$

$Ph = pci$ à humidité H (KJ/kg)

$Po = pci$ sur bois anhydre (KJ/kg)

Le pouvoir calorifique supérieur des bois tropicaux est en moyenne de 20 MJ/kg (4700 à 4800 Kcal/kg). Certains bois peuvent s'écarter de cette moyenne.

2 - LA TOURBE

21 - Nature et mode de formation de la tourbe

La tourbe est un dépôt d'origine végétale, essentiellement organique, en voie de décomposition, forme au cours de l'époque quaternaire en milieu aquatique dans un certain nombre de sites ou tourbières dont beaucoup fonctionnent encore de nos jours (8).

Les conditions de gisement dépendent essentiellement des facteurs locaux climatiques, topographiques et hydrogéologiques. La tourbe se développe par accumulation de végétaux dans des zones où l'abondance de l'eau et la température favorisent, d'une part, leur croissance et, d'autre part, empêche leur décomposition en profondeur, subit à l'abri de l'air sous une faible couverture d'eau en milieu réducteur et anaérobie, une dégradation lente biochimique appelée humification.

Dans son environnement naturel, la tourbe contient 80 à 90 % d'eau, le reste étant constitué de matières végétales et de matières minérales. Ces dernières peuvent représenter 2 à 50 % du poids de matière sèche et constituent ce que l'on appelle les cendres. La vitesse d'accumulation de la tourbe varie beaucoup suivant le contexte morfo-climatique et le type de végétation. En règle générale, elle est plus élevée en zone tropicale qu'en zone tempérée.

La profondeur de ces dépôts organiques varie de quelques dizaines de centimètres pour des tourbières récentes, à plusieurs dizaines de mètres pour les tourbières anciennes. Une épaisseur de 1 à 2 m est en général nécessaire pour qu'une tourbière soit économiquement intéressante, mais d'autres paramètres interviennent également (superficie de la tourbière, qualité de tourbe). Ces dépôts sont tous situés à proximité ou en surface du terrain naturel car ce sont, de par leur nature même, des formations récentes à l'échelle des temps géologiques.

Dans notre expérience, nous avons travaillé sur de la tourbe exploitée dans la zone des Niayes, si tuée le long de la côte ouest du Sénégal. Cette tourbe de bonne qualité contient en moyenne 25 % de sable.

22 - Les caractéristiques physico-chimiques de la tourbe

La tourbe se caractérise par une forte teneur en eau (80 à 90 %), une forte concentration en matières volatiles (60 à 70 %), une teneur totale en carbone fixe moins élevée (50 à 60 %) que les autres combustibles fossiles, une faible densité sur sec voisine de l'unité, une faible valeur de réflectance, une faible teneur en soufre et des teneurs relativement élevées en oxygène et en azote.

Ces caractéristiques confèrent à la tourbe un pouvoir calorifique peu élevé, supérieur cependant à celui des combustibles ligneux (bois), une réactivité élevée due au taux de matières volatiles assez important. Cette dernière donne à la tourbe une bonne aptitude à la combustion et à la gazéification (8).

Le tableau ci-dessous montre les principales caractéristiques de la tourbe par rapport à quelques combustibles usuels.

TABLEAU 1: Principales caractéristiques de la tourbe par rapport à quelques combustibles usuels (d'après le rapport de synthèse géologique du Projet d'exploitation des Tourbes des Niages - Janvier 1984).

| % sur sec | bois | tourbe | lignite | l-mille | fuel |
|---|-------------|-------------|-------------|-----------|---------------|
| Carbone | 48-50 | 50 - 60 | 60 - 75 | 76 - 95 | 80 - 86 |
| Hydrogène | 6,0 - 6,5 | 5 - 6,5 | 4,5 - 5,5 | 2,5 - 5,0 | 11,5 - 12,5 |
| Oxygène | 38-42 | X1-40 | 15 - 30 | 2 - 15 | 1,5 - 2,5 |
| Azote | 0,5 - 2,5 | 1,0 - 2,5 | 1,0 - 2,0 | 0,5 - 1,5 | 0,2 - 0,3 |
| Soufre | | 0,1 - 0,2 | 0,5 - 3,0 | 1,0 - 3,0 | 2,0 - 2,8 |
| Matières volatiles | 70 - 85 | 60 - 70 | 40-60 | 5-50 | |
| Pouvoir calorifique @rieur (Kcal/kg) | 3400 - 4600 | 3400 - 5100 | 4800 - 6800 | m - m | 9900 - 10 000 |

Chapitre II

LA CARBONISATION

La carbonisation est la décomposition thermo-chimique de la matière organique en conditions contrôlées. Selon l'intérêt qu'ils portent sur le produit final, certains auteurs utilisent d'autres termes pour désigner le même processus :

- . carbonisation : finalité \longrightarrow charbon de bois
- . distillation : finalité \longrightarrow jus pyroligneux
- . gazéification : finalité \longrightarrow gaz

Suivant l'appareillage utilisé, on distinguera trois types de carbonisation' (Fig. 9) :

- la carbonisation par combustion partielle : l'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par une partie de la charge (fosses, meules, fours en maçonnerie, fours métalliques) ;
- la carbonisation par chauffage externe : l'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par un foyer de chauffe externe par l'intermédiaire d'une surface d'échange (vase, clos, cornue) ;
- la carbonisation par contact de gaz chaud : l'énergie nécessaire à la carbonisation est fournie par des gaz chauds provenant d'un foyer externe et mis en contact direct avec la charge.

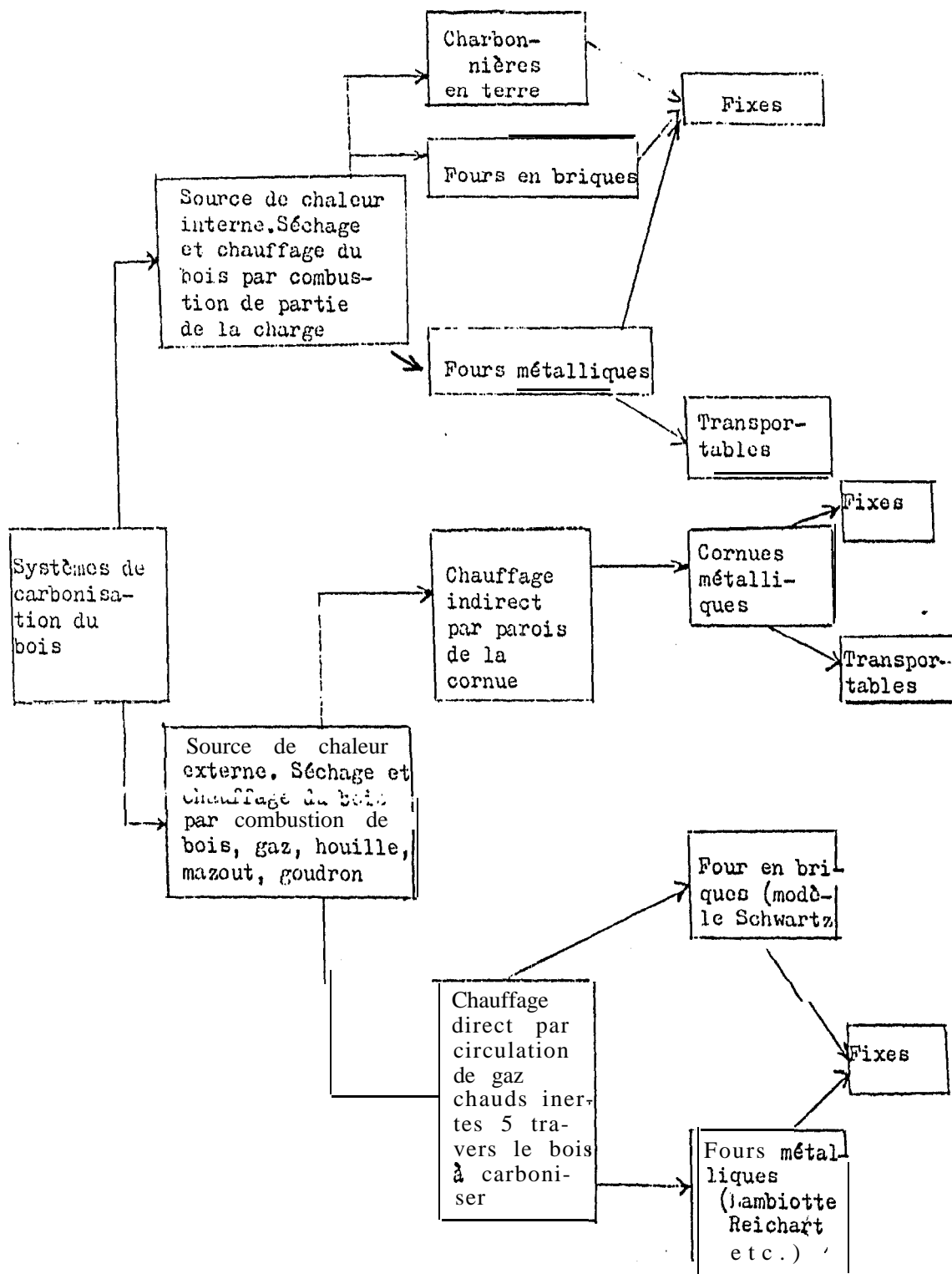
Dans notre étude, il s'agira surtout de carbonisation par combustion partielle.

1 - LES DIFFERENTES ETAPES DE LA CARBONISATION

En fonction de l'évolution de la température, on distingue cinq grandes étapes lors du processus de carbonisation par combustion partielle : la combustion, la déshydratation, la distillation (carbonisation) et le refroidissement (Fig.10 et Tab. 2) (6).

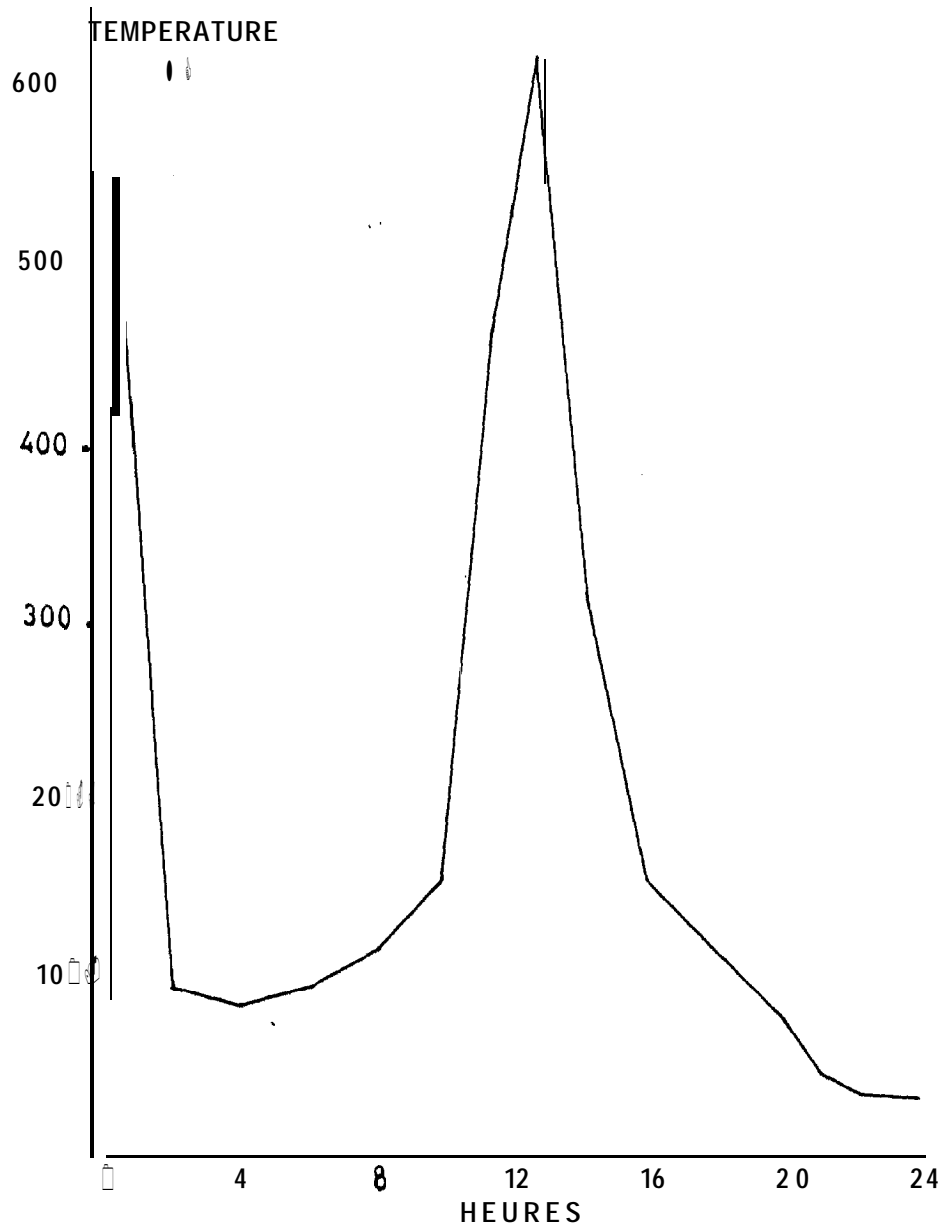
11 - La combustion

Lorsque le feu est mis en place par les points d'allumage, la température monte brusquement jusqu'à 600 ou 900°C. En effet, une partie de la



Classification des systèmes de carbonisation

Fig 10: Carbonisation de l'Eucalyptus saligna en four métallique portable (Mark V)
Evolution de la température en fonction du temps.



d'après André Moyer (Uganda Avril 70)

TABLEAU 2 : Les différentes phases d'une carbonisation partielle en fonction de l'évolution de la température d'après A. MAYER (SD). Ouganda, Avril 1970

| St a d e | Température | Produits |
|-----------------------------|---------------------------------|--|
| Combustion | Température ambiante à 600°C | CO ₂ , H ₂ O |
| Déshydratation | 100 à 120°C | H ₂ O |
| Distillatim (carbonisation) | 270 - 600°C | <ul style="list-style-type: none"> - acide acétique - eau - méthanol - goudron - CO₂, CO, CH₄, H₂, N₂ |
| Refroidissement | 600°C à la température ambiante | |

(Charcoal from portable kilns and fixed installations).

charge en contact direct des braises et en excès d'oxygène s'enflamme très vite. Ce phénomène déclenche aussitôt les phases suivantes.

12 - La déshydratation

Entre 100 et 200°C, le bois perd surtout son humidité. C'est la période endothermique correspondant au séchage, au cours de laquelle peuvent être éliminés quelques composés volatils entraînés par la vapeur d'eau. La durée de cette phase dépend de l'humidité du bois et de la méthode de carbonisation.

13 - La distillation (carbonisation) . '

Dès que l'eau est éliminée, il y a une augmentation très rapide de la température consécutive à la décomposition des constituants du bois (réaction exothermique). Il se forme un mélange de produits constitué principalement d'acide acétique, de méthanol et de goudron qui s'échappent dans la fumée. Si la structure de la cheminée (ou des cheminées) le permet, ce mélange peut se condenser et couler sous forme de jus pyroligneux sur les parois internes.

La fin de la phase de distillation se manifeste par la réduction et le changement de couleur des fumées qui deviennent bleues. Il faut alors arrêter la carbonisation.

14 - Le refroidissement

Le temps de refroidissement dépend de la technique de carbonisation, de l'épaisseur et de la capacité radiative des parois de l'appareil utilisé,

Le tableau ci-après montre les différentes phases d'une carbonisation partielle en fonction de l'évolution de la température d'après une étude d'André MAYER (18).

2 - LES MECANISMES CHIMIQUES DE LA CARBONISATION

La formation du charbon et des produits de distillation se réalise à partir des différents composés constituant le bois. Cette formation a lieu au fur et à mesure de la dégradation de ces constituants dont elle suit la facilité de dégradation.

A partir des hémicelluloses (xylanes), composés les moins stables thermiquement, se forme tout d'abord de l'eau qui s'ajoute à celle qui provient de l'humidité du bois, puis de l'acide acétique et formique provenant des groupements acétyles et carbonyles des acides uroniques et du furfural par déshydratation.

La cellulose est caractérisée par une grande stabilité thermique due aux liaisons hydrogènes des chaînes de glucose donnant à la cellulose sa structure cristalline. La pyrolyse de la cellulose conduit par hydrolyse interne et déshydratation à un produit primaire qui est le levoglucosane. Celui-ci est stable jusqu'à environ 210°C, mais se décompose à partir de 270°C pour donner de l'eau, les acides formiques et acétiques et des produits phénoliques. A partir de 500°C, une partie des grosses molécules se reconduisent et s'agrègent au charbon. Les petites molécules, elles, se décomposent à 250°C pour donner les gaz obtenus lors de la carbonisation (gaz carbonique, oxyde de carbone et acide acétique).

Les lignines se décomposent par rupture de liaison éther (fragiles) C-O-C et donnent des fragments aromatiques : vanilline, syringaldehyde, phénols, crésols et gâfacol.(5)

Ces produits phénoliques se décomposent au fur et à mesure que la température augmente pour donner du méthanol qui provient des groupements méthoxyles substituant sur les cycles.

Notons que le charbon est produit par tous les composés organiques. Toutefois, les quantités recueillies dépendent de la nature de la matière

première, . Les rendements en charbon sont élevés pour la lignine (50 à 60 %), faibles pour la cellulose et les hydrates de carbone en général (20 à 25 %), donc intermédiaires pour le bois. De même, tous les constituants du bois donnent des gaz, mais la plupart d'entre eux proviennent de la cellulose et des pentosanes, tandis que les lignines se gazeifient beaucoup plus lentement, Elles donnent, cependant, plus d'hydrocarbures que la cellulose, toutes choses égales par ailleurs (5).

3 - LES FACTEURS AGISSANT SUR' LA CARBONISATION

De nombreux paramètres influent sur les résultats d'une carbonisation (rendement en charbon, gaz et pyroligneux, temps de carbonisation, qualité du charbon, etc.), mais l'importance de chacun de ces paramètres dépend de la méthode de carbonisation.

31 - La température

La température de carbonisation, conditionnant les propriétés physico-chimiques des produits obtenus, est, certes, l'un des facteurs les plus importants. Il est donc nécessaire de bien la contrôler pour obtenir un charbon aux caractéristiques désirées. Il se trouve cependant que le contrôle se heurte à plusieurs difficultés dans le cas des carbonisations par combustion partielle.

La quantité de gaz et de pyroligneux produite est proportionnelle à la température de réaction, contrairement au rendement pondéral. La qualité chimique du charbon (% de carbone fixe) augmente avec la température au détriment de ce même rendement. En effet, la perte de matières volatiles est d'autant plus importante que la température de réaction est élevée, ce qui favorise l'augmentation du taux de carbone fixe et une baisse du rendement.

32 - La durée de carbonisation et le gradient de température

Lors de la décomposition thermo-chimique de la matière ligneuse, la répartition quantitative et les qualités des composés formés sont strictement liées à la cinétique de réaction de décomposition, elle-même liée au gradient de température et à la durée de carbonisation.

En effet, au cours d'une carbonisation (pyrolyse lente), les composés ont le temps de se former puis de réagir les uns sur les autres ou de se s'autopolymériser lors de réactions secondaires. Tel n'est plus le cas lors d'une pyrolyse rapide et d'une gazéification où la montée de température est inférieure à une seconde. On n'obtient pratiquement plus de charbon, mais presque uniquement des gaz et des liquides (23).

33 - La matière première

Les caractéristiques de la matière première ont une incidence sur le choix et sur les performances de l'équipement de carbonisation. Les trois facteurs les plus importants sont l'essence, la teneur en humidité et les dimensions des bois.

33.1 - L'ESSENCE

En règle générale, toutes les essences de bois peuvent être carbonisées pour produire un charbon utilisable. La teneur en cendre est peu variable d'un bois à l'autre, mais varie considérablement à l'intérieur d'un même bois. En effet, l'écorce a une teneur en cendre excessive et donne un charbon très friable pour la plupart des usages.

Les résineux (gymnosperme) donnent en général un bois plus friable et moins dense que les feuillus tropicaux (angiospermes). Ce phénomène s'explique par le fait que les feuillus tropicaux sont souvent plus denses et plus riches en lignine que les résineux. Les bois malades ou pourris produisent un charbon de mauvaise qualité qui est beaucoup plus friable car la structure de départ est plus fragile.

Les essences de reboisement à croissance rapide (fort accroissement en volume) donnent en général un bois peu dense et, par conséquent, un faible rendement en charbon par unité de volume de bois. Il sera ainsi nécessaire de choisir les essences et les modes de traitement qui procurent un rendement maximum de bois en poids. Dans l'état actuel des recherches, les *Eucalyptus* restent le genre botanique le plus en faveur.

3 3 . 2 - LA TENEUR EN HUMIDITE

L'humidité contenue dans la charge du bois doit être évaporée en brûlant une quantité supplémentaire de bois, ce qui abaisse le rendement global. La durée du cycle complet de carbonisation se trouve également augmentée, d'où accroissement des coûts. Le volume du bois vert étant supérieur, par ailleurs, à celui du bois sec, le coefficient de remplissage se trouve diminué lorsqu'on enfourne du bois vert (5).

Le séchage à l'air de certaines essences (*Acacia seyal*, *Prosopis*, etc.) présente un certain nombre de contraintes, à savoir : les pertes dues à l'altération par les champignons et les attaques d'insectes. Il faut trouver alors un compromis entre le temps de séchage afin d'avoir une perte d'humidité maximale, et les pertes dues aux insectes et aux ch-gnons.

3 3 . 3 - LES DIMENSIONS DES BOIS

La vitesse de carbonisation est en relation étroite avec la taille des bois. Les gros morceaux se carbonisent lentement du fait que la transmission de chaleur à l'intérieur du bois est relativement lente. Notons que la section transversale du bois a une influence plus prépondérante que la longueur dans le sens du fil de bois.

Avec des bois provenant des peuplements artificiels, il est possible d'avoir des morceaux de dimension uniforme. En forêt naturelle, on aura des bois de taille très variée. Le tronçonnage et le fendage augmentant le prix de revient de la matière première, il serait préférable de carboniser le bois de gros diamètre en fosse ou en meule qui ont un cycle lent de carbonisation.

34 - Le type d'installation et la qualification de l'opérateur

Dans le cas de procédé par combustion partielle, la qualification de l'opérateur est très importante mais dépend du type d'installation utilisé. Dans certains procédés artisanaux traditionnels, type meule ou fosse, elle est le facteur prépondérant à la bonne marche de l'opération. Pour les fours métalliques, la qualification requise est moindre.

Dans les unités industrielles, la qualification des opérateurs intervient généralement très peu sur le fonctionnement, puisque les réacteurs sont le plus souvent automatisés. Il n'en demeure pas moins que tout projet de carbonisation doit s'appuyer sur des actions de formation.

4 - NOTIONS DE RENDEMENTS

Pour éviter toute évaluation erronée d'une carbonisation, il est important de définir et de préciser les notions de rendements.

Les valeurs de rendement pondéral sont très différentes selon qu'elles sont exprimées en masse de charbon par stère, en masse de charbon par masse de bois initial humide ou en masse de charbon par masse de bois anhydre. Ce dernier est le seul qui permet une comparaison assez rigoureuse de plusieurs carbonisations.

On définit par ailleurs un rendement énergétique de la transformation de la matière première en charbon, qui est le rapport entre l'énergie calorifique potentielle du charbon produit et l'énergie calorifique potentielle du bois brut initial :

Exemple :
 M = Masse brute du bois enfourné
 M_0 = Masse anhydre du bois enfourné
Humidité sur brut : $\frac{M - M_0}{M}$
 m = Masse du cb.arbon produit
Rendement pondéral sur matière brute : $\frac{m}{M}$

Rendement pondéral sur matière anhydre : $\frac{m}{M_0}$

Rendement énergétique de la transformation

$$\frac{m \times pci \text{ du charbon}}{(pci \text{ bois anhydre} \times M_0) - E}$$

$$E = 2\,250 \text{ KJ/kg}$$

E = Energie de vaporisation de l'eau contenue dans le bois.
 pci = pouvoir calorifique supérieur

Le rendement d'une carbonisation dépend de l'humidité du bois enfourné, de la température finale de carbonisation, de la qualification de l'opérateur et de l'appareillage utilisé. Il est en moyenne de 15 % pour la meule et de 25 % pour les fours métalliques à combustion partielle (6).

La notion de rendement volumique (volume charbon produit/volume bois initial) intéresse plus particulièrement le producteur qui vend le charbon en litre. Cette notion est peu précise, puisque la quantité du bois anhydre contenue dans un même volume n'est pas constante selon l'essence, l'humidité et les dimensions.

5 - NATURE ET PROPRIETES DU CHARBON DE BOIS

Les propriétés physiques et chimiques du charbon dépendent de l'espèce et de la méthode de carbonisation. La plupart des usagers du charbon de bois préfèrent un charbon résistant, facilement inflammable et à bon rendement énergétique.

51 - Les propriétés physiques du charbon de bois

La densité d'un charbon de bois dépend de la densité du bois d'origine. Elle est inversement proportionnelle à la température finale de carbonisation du fait du départ important de matières volatiles quand la température augmente. La densité apparente varie entre 0,2 et 0,5 et la densité réelle de 1,3 à 1,5.

La surface spécifique augmente avec la température finale de carbonisation. En effet, la baisse du taux de matières volatiles, due à l'augmentation de la température finale de carbonisation, améliore la porosité du charbon. L'activation du charbon augmente de 100 à 1000 fois la surface spécifique.

51.1 - LA REPRISE D'HUMIDITE OU STABILITE'

Le charbon est un matériau relativement inerte, mais peut prendre rapidement de l'oxygène aussitôt après la carbonisation. Des précautions doivent être prises à cet égard pour limiter les combustions spontanées 24 heures après la carbonisation.

51.2 - LA FRIABILITE

Il n'y a pas de corrélation entre la résistance du charbon, l'âge et l'humidité du bois enfourné et la température finale de carbonisation (6).

52 - Les propriétés chimiques du charbon de bois

52.1 - LES MATIERES VOLATILES

En dehors de l'eau, les matières volatiles contenues dans le charbon comprennent tous les résidus liquides et goudronneux qui ne sont pas totalement éliminés lors de la carbonisation. Si celle-ci est prolongée à haute température, la teneur en matières volatiles est faible. Au contraire, si la température de carbonisation est peu élevée et que le temps de séjour dans le four est bref, cette teneur augmente. La teneur en matières volatiles peut varier entre un minimum de 5 % et un maximum de 40 % (6).

Un charbon de bois à teneur élevée en matières volatiles brûle avec une flamme fumeuse, tandis qu'un charbon à faible teneur en matières volatiles sera difficile à allumer mais brûlera avec une flamme claire. Un bon charbon de bois commercial doit avoir une teneur nette en matières volatiles (sans humidité) de l'ordre de 30 %. Une teneur élevée en matières volatiles donne un charbon moins friable que le charbon à carbonisation poussée et faible teneur en matières volatiles et produit moins de poussière

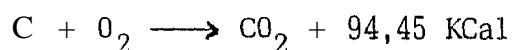
lors du transport et des manipulations. Il est également plus hygroscopique et a donc une teneur en humidité d'équilibre plus élevée (6).

52.2 - LA TENEUR EN CARBONE PUR (CARBONE FIXE)

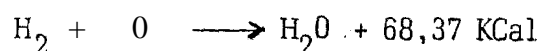
La teneur du charbon de bois en carbone pur peut varier entre 50 et 95 % suivant la température de carbonisation. La teneur en carbone fixe est obtenue en soustrayant de 100 le taux de matières volatiles, le taux de cendre et l'humidité du charbon. La teneur en carbone pur est l'élément le plus important en métallurgie étant donné que c'est elle qui est responsable de la réduction des oxydes de fer du minéral. Mais l'industrie doit faire un compromis entre la friabilité du charbon à haute teneur en carbone et la plus grande résistance du charbon à teneur plus faible en carbone pur, mais plus élevée en matières volatiles, de façon à obtenir la meilleure marche du haut fourneau.

52.3 - LE POUVOIR CALORIFIQUE

Le *pcs* est pratiquement fonction de la quantité de carbone contenu dans le matériau à analyser. Un charbon à fort pourcentage de matières volatiles aura un *pcs* équivalent à celui d'un charbon à fort pourcentage de carbone, du fait de la grande différence d'énergie fournie par la combustion du carbone et de l'hydrogène (18).



1 gramme de carbone produit = 7,9 KCal



1 gramme d'hydrogène donne 34 KCal

Notons qu'il y a une faible corrélation entre *pcs* et taux de matières volatiles (18) .

5 2 . 4 - LES TENEURS EN CENDRES

Le taux de cendres du charbon de bois varie entre 0,5 et plus de 5 % selon l'essence, la proportion d'écorce introduite avec le bois dans le four ou la charbonnière et l'importance des impuretés (terre, sable...) (5).

Les cendres se composent de matières minérales telles qu'argile, silice, oxydes de calcium, de magnésium, etc présentes à l'origine dans le bois ou constituant des impuretés apportées par la terre au cours de la carbonisation (annexe 1 : détermination du taux de cendres).

Chapitre III

ET U'D E E X P E R I M E N T A L E

Les fours métalliques, qui peuvent être démontés et déplacés, sont utilisés en Europe depuis plusieurs années. A l'origine, ils permettaient de carboniser le bois dans les forêts d'accès difficile et de transformer sur place le bois de médiocre qualité. Utilisés dans des conditions adéquates, les fours métalliques ont représenté, dans de nombreuses régions d'Europe, un système commercial éprouvé (3). Dans certains pays en développement où ils ont été introduits, leur succès n'a pas été aussi retentissant du fait d'un manque d'informations ou de formation des futurs utilisateurs.

Le four expérimenté dans le cadre de notre étude a été construit sur financement du FAC (Fonds d'Aide et de Coopération française) à la demande de la Compagnie des Tourbières du Sénégal (CTS). A ce jour, dix essais ont été effectués dont trois sur la tourbe.

1 - MATERIEL ET METHODE

11 - Matériel

11.1 - DESCRIPTION DU FOUR

Le modèle de four que nous avons utilisé, à quelques modifications près, a été conçu par l'Institut Britannique des Produits Tropicaux. Il s'agit du four TP1 qui comporte (photo n°1).

- deux sections cylindriques de 2,56 m de diamètre s'emboîtant entre elles,
- un couvercle conique pourvu de quatre orifices d'échappement de vapeurs régulièrement espacés pouvant être obturés avec des tapes lorsque c'est nécessaire, Entre deux orifices, figure une poignée pour soulever le couvercle,
- deux rebords en fer cornière de 50 mn servant à supporter la section supérieure et le couvercle sont soudés au sommet intérieur des deux sections cylindriques,
- huit conduits d'entrée d'air et de sortie des gaz sont aménagés à la base de la section inférieure. Dans ces conduits, pénètrent quatre évents et quatre supports de cheminées,

- quatre cheminées s'emboîtent dans des collets soudés sur les conduits de sortie de gaz:

Les deux sections principales du four portent chacune quatre poignées et trois orifices situés à différents niveaux par où pénètrent des sondes pyrométriques. Le volume du four est de 8 m³.

Le matériau utilisé pour la confection du four comporte :

- 13 m² de tôle d'acier de 40/10 de mm d'épaisseur pour les sections inférieure et supérieure ;
- 16 m² de tôle d'acier de 20/10 de mm d'épaisseur pour les cheminées, leurs supports, les événements et le couvercle ;
- 18 m de fer cornière de 40 x 4 mn,
- 6 m de fer plat de 30 x 5 mn,
- 6 m de fer en T de 35 x 5 mn,
- 4 m de fer rond de 14 mm de diamètre,

Les modifications que nous avons apportées sont les suivantes : dans le prototype, les deux sections principales reposent sur les conduits d'air et de vapeur. Pour renforcer l'étanchéité du four, nous avons aménagé des trous à la base de la section inférieure où pénètrent les conduits. Pour la récupération de pyroligneux, nous avons fermé les deux grandes bases des conduits d'entrée d'air et de sortie de vapeurs et aménagé des trous de 3 cm de diamètre au niveau des petites bases (elles-mêmes fermées) des supports de cheminée. Il faut préciser qu'il s'agit des petites bases situées du côté externe du four. Pour suivre la température, nous avons, enfin, aménagé six orifices au niveau des deux sections principales par où pénètrent des sondes pyrométriques à thermocouple.

ERRATA

Dans le calcul de l'amortissement du four (formule page 54), le salaire journalier d'un manoeuvre sera remplacé par le nombre d'hommes / jour par fournée. On obtiendra, de ce fait, un amortissement par journée de travail (AM).

$$AM = \frac{\text{Prix de revient du four (598.026 F CFA)}}{\text{Durée de vie du four (2 ans)} \times \text{Nombre de fournées par semaine (2)} \times \text{Nbre de semaines de travail par an (49)} \times \text{Nombre d'hommes jour par fournée (x)}}$$

x variable dépend de la matière première carbonisée. Connaissant la production de charbon (P Ch/j). On peut calculer l'amortissement par kilogramme de charbon produit (a m).

Application numérique,

| | | | |
|---|-----------------------------------|--|--------|
| Nombre d'hommes/jour par an |) 2 x 2 x 49 x 4,6 = 901 | | Tour |
| |) 2 x 2 x 49 x 2,8 = 548,8 | | Bois |
| Amortissement de par journée de travail |) 598026 / 901,6 = 663,29 F CFA | | Tourbe |
| |) 598026 / 548,8 = 1 089,69 F CFA | | Bois |
| Quantité de charbon produite par journée de travail. |) 190,2/4,6, = 260,65 Kg | | Tourbe |
| |) 480,5/2,8 = 171,60 Kg | | bois |
| Amortissement par kilogramme de charbon produit (a m) |) 663,29/260,65 = 2,54 CFA | | Tourbe |
| |) 1089,69/171,60 = 6,35 F CFA | | Bois |

Si on tient compte de ce nouveau coût de l'amortissement du four, le prix de revient technique du kilogramme de charbon sera de 7,14 F CFA pour la tourbe et de 13,74 F CFA pour le bois. Ces chiffres doivent remplacer ceux avancés dans les pages : 54, 55 et 69.

12 - Méthode

Toutes les carbonisations reposent presque sur le même principe : conditionnement du bois, chargement du four, allumage, carbonisation, refroidissement et défournement.

12.1 - LE CONDITIONNEMENT DU BOIS

Le bois abattu est tronçonné et empilé au moins trois semaines avant d'être carbonisé. Les dimensions les plus convenables sont de 45 à 65 cm de long et jusqu'à 20 cm de diamètre. Le bois de plus de 30 cm de diamètre doit être refendu. Il n'est pas recommandé de mélanger, dans une même charge, des branches de moins de 4 cm de diamètre avec des bois de très gros diamètre.

12.2 - LE CHARGEMENT DU FOUR

La section inférieure du four est d'abord placée dans un endroit bien dégagé, balayé d'une façon homogène par le vent. Les conduits de gaz sont mis en place le plus profondément possible pour éviter une surchauffe de la paroi.

Pour faciliter la circulation des gaz, on constitue une sorte de soubassement à la charge constitué de rondins de diamètre moyen disposé radicalement au fond de la première virole. Au centre du soubassement, on met du petit bois sec d'allumage et de la paille sèche. L'humectage de ce matériau par un mélange d'huile de vidange et de gaz-oil peut rendre l'allumage plus facile.

Par dessus les longerons et le matériau d'allumage, on pose en croix des bois de petit et moyen diamètre et des fumerons (bois incomplètement carbonisés provenant d'une fournée précédente). Notons que cette première couche doit couvrir complètement tous les longerons visibles. Cette phase préliminaire est valable aussi bien pour la tourbe que pour le bois.

Dans le cas de la tourbe, la suite du travail consistera à vider en vrac les sacs contenant les briquettes dans le premier puis dans le deuxième compartiment jusqu'à la formation d'un cône aplati. Dans le cas du bois, le premier puis le deuxième compartiment sont chargés de couches successives de bois en garnissant le plus possible les vides et en plaçant le gros bois vers le centre jusqu'à la formation d'un cône aplati.

La mise en place du couvercle met fin au travail d'enfournement. On prendra soin de mettre en place les sondes pyrométriques à chaque fois que leurs niveaux respectifs sont atteints pendant l'enfournement.

12.3 - L'ALLUMAGE

Pour augmenter l'étanchéité du four, on met du sable ou de la terre argileuse dans les joints entre les deux sections et entre la section supérieure et le couvercle. Après s'être assuré que les quatre orifices de sortie de vapeur du couvercle sont bien ouverts, on allume le feu au niveau des quatre événements en commençant par les côtés opposés au vent. Quand le feu a bien pris, on adapte des pots de deux litres à la base des supports de cheminée pour la récupération du pyroligneux (photo n° 1).

12.4 - SUIVI DE LA CARBONISATION

On laisse le four brûler lentement pendant trente minutes à une heure (suivant l'humidité du bois). Pendant ce temps, il se dégage une vapeur abondante de couleur blanchâtre aux quatre orifices du couvercle (tirage direct). Le tirage sera réduit par la mise en place des cheminées et la fermeture des orifices de vapeur. Pour renforcer l'étanchéité, on met de la terre argileuse sur les tapes (couvercles des orifices de vapeur) et entre les cheminées et leur supports. Ainsi, l'air ne pénètre plus dans le four que par les conduits d'admission (événements) et, de là, il monte en passant par le centre de la charge. Les gaz de combustion, aspirés par le tirage, descendent et s'échappent par les cheminées. L'air et les gaz de combustion circulent en sens inverse : le tirage est dit "inversé" (photo n° 1).

PHOTO 1 Début de la phase de tirage inversé. Les troischeminées sont déjà en place et les événements situés du côté du vent fermés pour diminuer l'entrée de l'air.



PHOTO 2 : Phase de refroidissement. Les cheminées sont dégagées. Leurs supports et les événements sont ensevelis de sable pour renforcer l'étanchéité du four.

L'évolution de la température à l'intérieur de la charge a pu être déterminée grâce à un thermomètre à thermocouple de type K (NiCR/NiAl). Ce thermocouple comporte six sondes pyrométriques reliées à un compteur digital. La température est notée toutes les trente minutes de l'allumage à l'inversion du tirage et toutes les heures jusqu'à l'arrêt complet de la carbonisation.

Nous avons également suivi l'évolution de la température des parois externes du four à l'aide d'un thermomètre digital à infrarouge (infratrace). Pendant toute la durée de la carbonisation, il nous arrivera de fermer et d'ouvrir les événements suivant que la montée de la température est trop rapide ou quand celle-ci diminue ou devient stationnaire.

Pour rendre la carbonisation plus homogène, on intervertit les cheminées et les événements six à sept heures après allumage. Dans le cas de la tourbe, il nous est souvent arrivé de sortir les cheminées, leurs supports et les événements pour dégager le résidu métallique et les cendres qui se déposent au niveau des conduits, empêchant ainsi la circulation normale des gaz.

Pour le contrôle de la carbonisation, nous avons adopté deux méthodes. Dans le premier cas, nous avons contrôlé systématiquement la circulation des gaz (en fermant ou en ouvrant les événements), ce en fonction de l'évolution de la température à l'intérieur de la charge. La deuxième méthode consistera à laisser évoluer la carbonisation toute seule, notre intervention se limitant à la permutation des cheminées et des événements et à la réduction de l'admission de l'air la nuit lorsque la surveillance s'avère inutile.

12.5 - LE REFROIDISSEMENT

Lorsque la couleur de la fumée qui se dégage des quatre cheminées devient bleue ou même limpide, on peut s'assurer que la carbonisation est terminée. Dans le cas de la tourbe où l'évolution de la température paraît plus normale, nous nous sommes fixés au départ une température finale de carbonisation au-delà de laquelle la distillation doit être immédiatement arrêtée. Compte tenu de la quantité importante de matières volatiles contenues dans la tourbe, cette température finale a été de 500 à 600°C.

L'arrêt de la carbonisation se fait par la fermeture des entrées d'air et des sorties de vapeur. Pour cela, on enlève les cheminées et on remplit de sable leurs supports et les événements (photo n° 2). Pour renforcer l'étanchéité du four, on ajoute de la terre argileuse entre les deux sections, du sable ou de la terre entre les deux sections inférieure et supérieure, entre la section supérieure et le couvercle et au niveau des tapes (couvercles de sortie de vapeur). On laisse ainsi le four se refroidir jusqu'au moment où la température à l'intérieur de la charge varie entre 25 et 30°C et sa surface externe soit froide au toucher (photo n° 2).

Le refroidissement dure 16 à 20 heures dans le cas du bois et plus de 48 heures pour la tourbe. Notons que la température à l'intérieur de la charge et sur les parois du four a été notée toutes les heures pendant la durée du refroidissement.

12.6 - LE DEFOURNEMENT ET LA MISE EN SAC

Lorsque la température, à l'intérieur de la charge, varie entre 25 et 30°C ou lorsque les parois externes sont froides au toucher, le four peut être ouvert. On commence par dégager le sable ou la terre entre les joints, dans les événements et les supports (ces derniers seront aussitôt retirés) photo n° 3). On enlève successivement le couvercle de la section supérieure. On commence tout d'abord par mettre en sac le charbon qui déborde de la section inférieure avant d'enlever cette dernière (photos 4 et 5).

Tout le charbon ensaché est pesé sur une bascule ainsi que les incuits. Le poids de ces derniers sera déduit du poids du bois initial enfourné. Le charbon de faible granulométrie (poussière) est laissé sur place du fait de sa commercialisation très difficile.



PHOTO 3 : Défournement - Dégagement des événements et des supports de cheminées.



PHOTO 4 : Défournement - Dégagement de la section supérieure



PHOTO 5 : Défournement et mise en sac. La première section est enfin dégagée.

13 - Résultats et interprétations

13.1 - RESULTATS

On s'intéressera surtout, ici, aux résultats de rendement pondéral sur matière anhydre et énergétique, aux résultats sur l'analyse physico-chimique du produit final (charbon), l'analyse Economique et les résultats de l'évolution de la température en fonction du temps de carbonisation.

Pour comparer nos résultats à ceux obtenus par les méthodes traditionnelles (meule traditionnelle et meule casamançaise), deux essais ont été effectués en Casamance, à l'Ecole des Agents Techniques des Eaux & Forêts (un essai sur chaque méthode). Nous n'avons malheureusement pas pu exploiter certaines données de la meule traditionnelle (rendements et analyses physico-chimiques), le charbon ayant été mouillé par le pluie lors du défournement.

TABLEAU 3 : Résultats de la carbonisation de différentes essences de reboisement en four métallique et meule casamançaise

| Essence | Carbonisation | Nombre de stères | Humidité du bois (%) | Rendement pondéral sur matière anhydre (%) | Rendement énergétique (%) |
|--------------------------|--------------------|------------------|----------------------|--|---------------------------|
| Eucalyptus tereticornis | Meule casamançaise | 15,5 | 22,5 | 32,1 | 47,3 |
| " | Four métallique | 5,0 | 23,7 | 27,6 | 45,4 |
| Prosopis juliflora | | | 15,0 | 26,0 | 34,6 |
| Eucalyptus camaldulensis | | | | | |
| (n° 1 | " | | 27,5 | 20,7 | 28,1 |
| n° 2 | | | 18,21 | 22,1 | 32,7 |
| n° 3 | " | | 9,1 | 31,07 | 50,2 |
| n° 4 | " | " | 9,48 | 29,0 | |
| n° 5 | " | " | 9,87 | 39,0 | |
| n° 6 | " | | 9,87 | 30,0 | |
| Neem | | " | 10,0 | 28,7 | 48,1 |

Dans la détermination de l'humidité, nous avons adopté la formule suivante :

$$M = \frac{M_h - M_o}{M_h}$$

M_h = Masse humide

M_o = Masse anhydre

L'humidité des bois carbonisés varie, dans une large gamme, entre 9 et 27 %. Ceci nous a permis de constater que les rendements pondéral sur matière anhydre et énergétique sont une fonction décroissante de l'humidité (Fig.11 et 12).

Pour une même espèce et des humidités voisines, les rendements pondéral sur matière anhydre et énergétique de la meule casamançaise sont relativement supérieurs à ceux du four métallique. Ces résultats doivent être commentés avec beaucoup de précautions, étant donné qu'ils sont obtenus à partir d'un seul essai, ce qui n'est pas du tout statistiquement représentatif.

TABLEAU 4 : Résultats de la carbonisation de la tourbe en four métallique transportable.

| | N° DES ESSAIS | | |
|--|---------------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Poids humide carbonisé (kg) | 3310 | 2801 | 2380 |
| Taux d'humidité (%) | 6,12 | 8,50 | 8,00 |
| Poids anhydre carbonisé (kg) | 3107 | 2562,9 | 2189,6 |
| Poids charbon (kg) | 1554,9 | 1045,9 | 997 |
| Rendement pondéral sur matière anhydre (%) | 50,0 | 40,5 | 45 |
| Rendement énergétique | 55,6 | - | - |
| Résidu métallique (%) | 0,76 | 0,86 | 0,85 |
| Pyroligneux (%) | 0,80 | 0,88 | 0,86 |

Les briquettes carbonisées ont été fabriquées à la Briquetterie de Pout. Il s'agit de la tourbe de bonne qualité (moins de 25 % de sable). Les briquettes utilisées pour le premier et le troisième essai étaient constituées de 100 % de tourbe alors que celles du deuxième contenaient 10 % de poussier de charbon de bois.

Les rendements moyens pondéral sur matière anhydre (45 %) et énergétique (55 %) sont supérieurs à ceux obtenus sur le bois, respectivement de 27, 6 et 39,8 %. Il apparaît un résidu métallique (0,82 % en moyenne), ce qui n'a nulle part été observé dans 10 cas du bois. Le pourcentage de pyrolyseux est relativement faible.

TABLEAU 5 : Résultats de l'analyse physico-chimique des charbons obtenus en carbonisation de différentes essences de reboisement en four métallique et meule casamançaise.

| ESSENCES | CARBONISATION | DENSITE | | NORME NF B 55.101 | | POUVOIR CALORIFIQUE SUPERIEUR (KJ/Kg) | | CARBONE FICHE (%) | TEMPERATURE MOYENNE DE CARBONISATION |
|-------------------------------|--------------------|---------|---------|--------------------|----------------------|---------------------------------------|---------|-------------------|--------------------------------------|
| | | Bois | Charbon | Condus 950°C - 3 h | Volatils 950°C - 1 h | Bois | Charbon | | |
| Eucalyptus tereticornis | Meule Casamançaise | 0,55 | 0,47 | 1,21 | 22,9 | 19.881 | 28 630 | 75,9 | - |
| Eucalyptus tereticornis | Four métallique | 0,55 | 0,49 | 2,23 | 30,1 | 19,081 | 31 840 | 67,7 | 360 |
| Prosopis juliflora | Four métallique | 0,80 | 0,61 | 3,05 | 35,6 | 20.436 | 26.750 | 61,3 | 256 |
| Neem | Four métallique | 0,77 | 0,52 | 3,00 | 14,8 | 10.799 | 30.570 | 82,2 | 369 |
| Eucalyptus camaldulensis n° 1 | Four métallique | 0,50 | 0,45 | 1,40 | 24,5 | 19.963 | 26.635 | 74,0 | 360 |
| " n° 2 | " | 0,50 | 0,47 | 2,54 | 31,4 | 19.963 | 28 720 | 66,1 | 276 |
| " n° 3 | " | 0,50 | 0,46 | 2,72 | 35,8 | 19,963 | 31.440 | 61,4 | 231 |
| " n° 4 | " | | | | | | | | |
| " n° 5 | " | | | | | | | | |
| " n° 6 | " | | | | | | | | |

Le taux de cendres varie très peu entre 1 et 3 %. En revanche, le taux de volatils varie dans une très large gamme, allant de 14,8 à 35,8 %. Ces deux caractéristiques ne sont pas corrélées au pouvoir calorifique supérieur. Les pouvoirs calorifiques supérieurs des charbons de certaines essences (*Prosopis juliflora* et *Eucalyptus camaldulensis* n° 1) sont relativement faibles (inférieurs à 27 000 KJ/Kg).

Pour une même espèce (*Eucalyptus tereticornis*), le pouvoir calorifique supérieur des charbons obtenus à partir du four métallique (31 400 KJ/kg) est supérieur à celui des charbons obtenus en meule casamançaise (28 630 KJ/kg). Le taux de carbone fixe est une relation décroissante du taux de volatiles (Fig. 13). Par contre, il n'y a pas de corrélation entre pouvoir calorifique et matières volatiles (Fig. 14).

La densité du bois de *Prosopis juliflora* est supérieure à celle des autres essences. Il en sera de même de la densité de son charbon.

TABLEAU 6 : Résultats des analyses physico-chimiques de la tourbe avant et après carbonisation

| | Avant carbonisation | Après carbonisation (1er essai) |
|---------------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| Pouvoir calorifique supérieur (KJ/kg) | 17 908 | 20 938 |
| Taux de matières volatiles (%) | 51,61 | 15,54 |
| Taux de cendres (%) | 14,37 | 33,3 |
| Taux de carbone fixe (%) | - | 51,0 |

Ces analyses physico-chimiques ont été effectuées par le Laboratoire de chimie du Ministère du Développement Industriel et de l'Artisanat. Ces chiffres représentent une moyenne obtenue sur dix échantillons :

- la variation du pouvoir calorifique après carbonisation est relativement faible ;
- le taux de matières volatiles a diminué presque d'un facteur 4 après carbonisation ;
- le taux de cendres passe du simple au double après carbonisation. Il est supérieur de 10 à 15 fois celui du charbon de bois (33 contre 2 à 3 %).

Fig 11: Carbonisation en four métallique transportable; variation de rendement pondéral en charbon sur matière anhydre en fonction de l'humidité du bois.

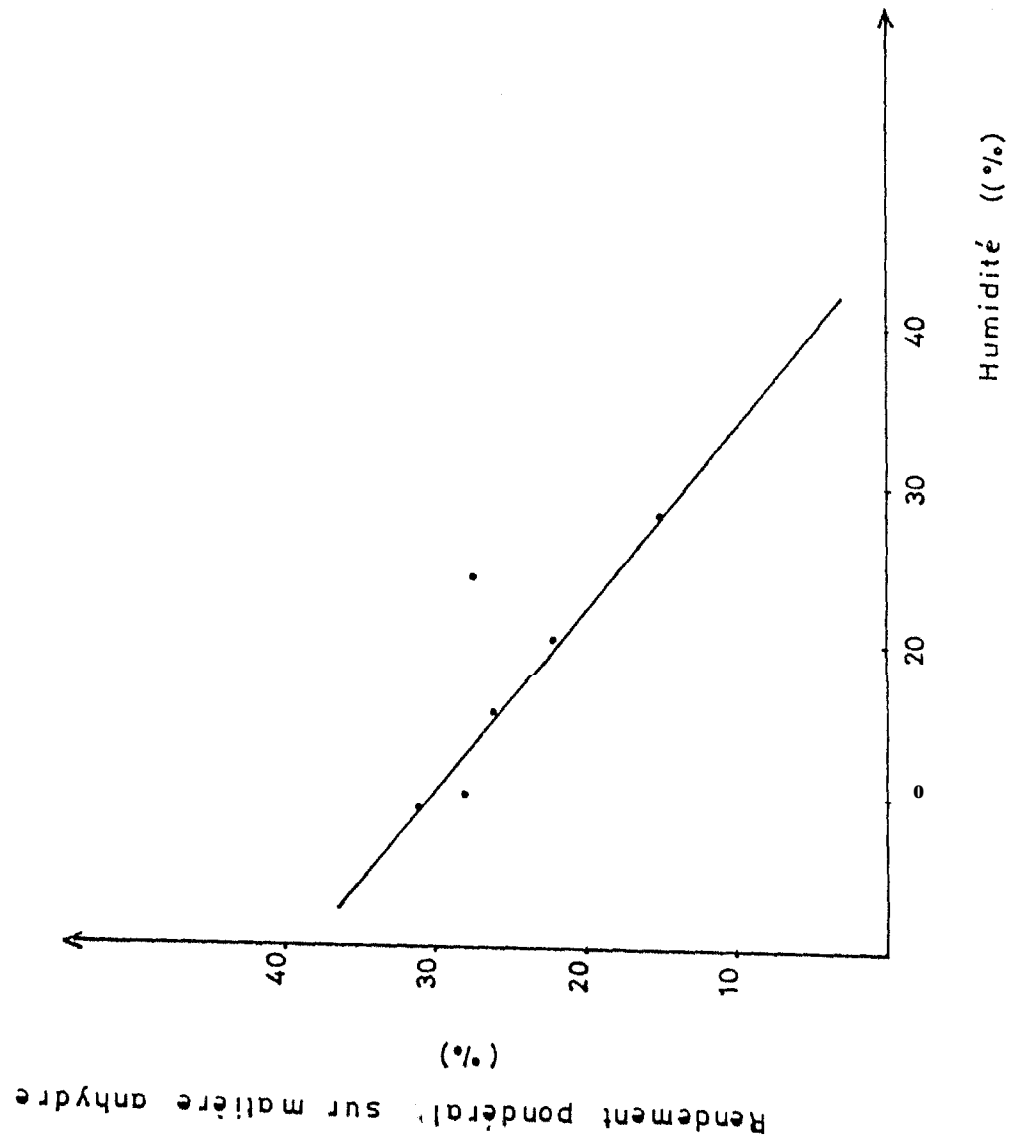


Fig 12: Carbonisation des journaux et variation du rendement énergétique à la carbonisation en fonction de l'humidité du bois.

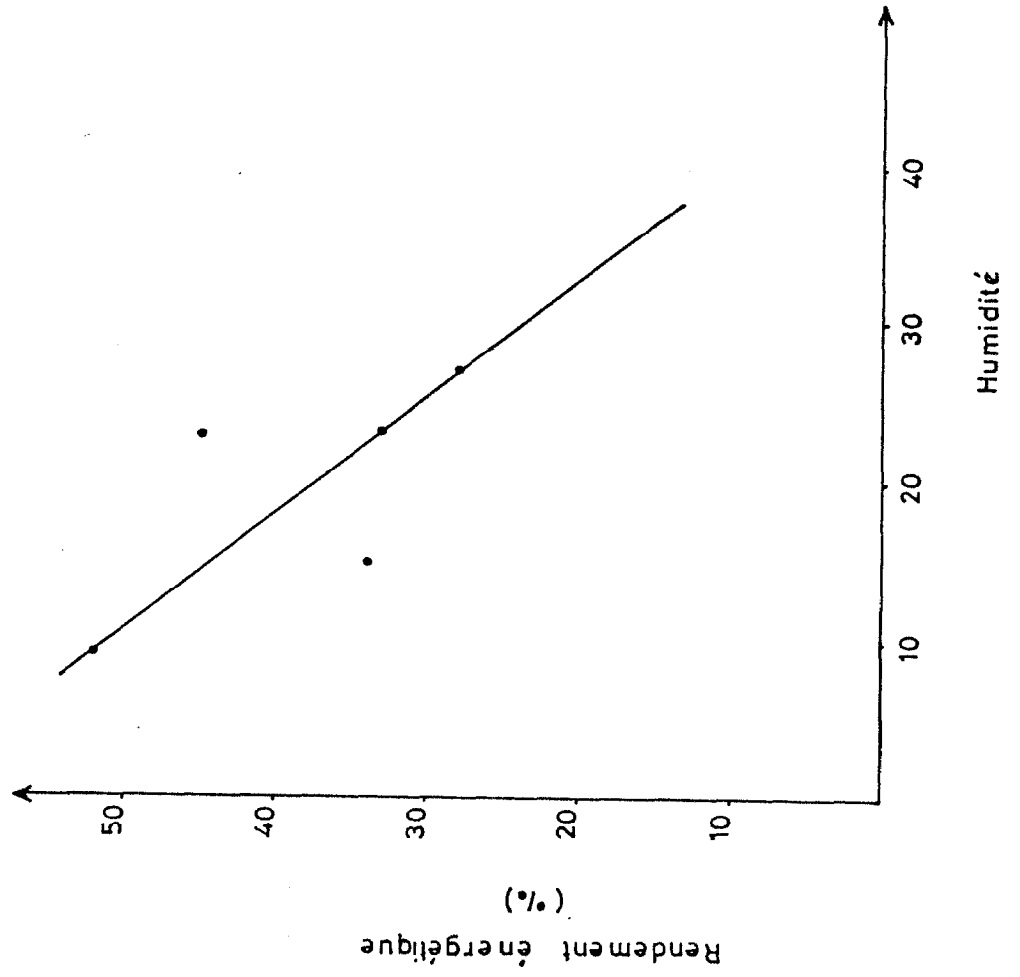
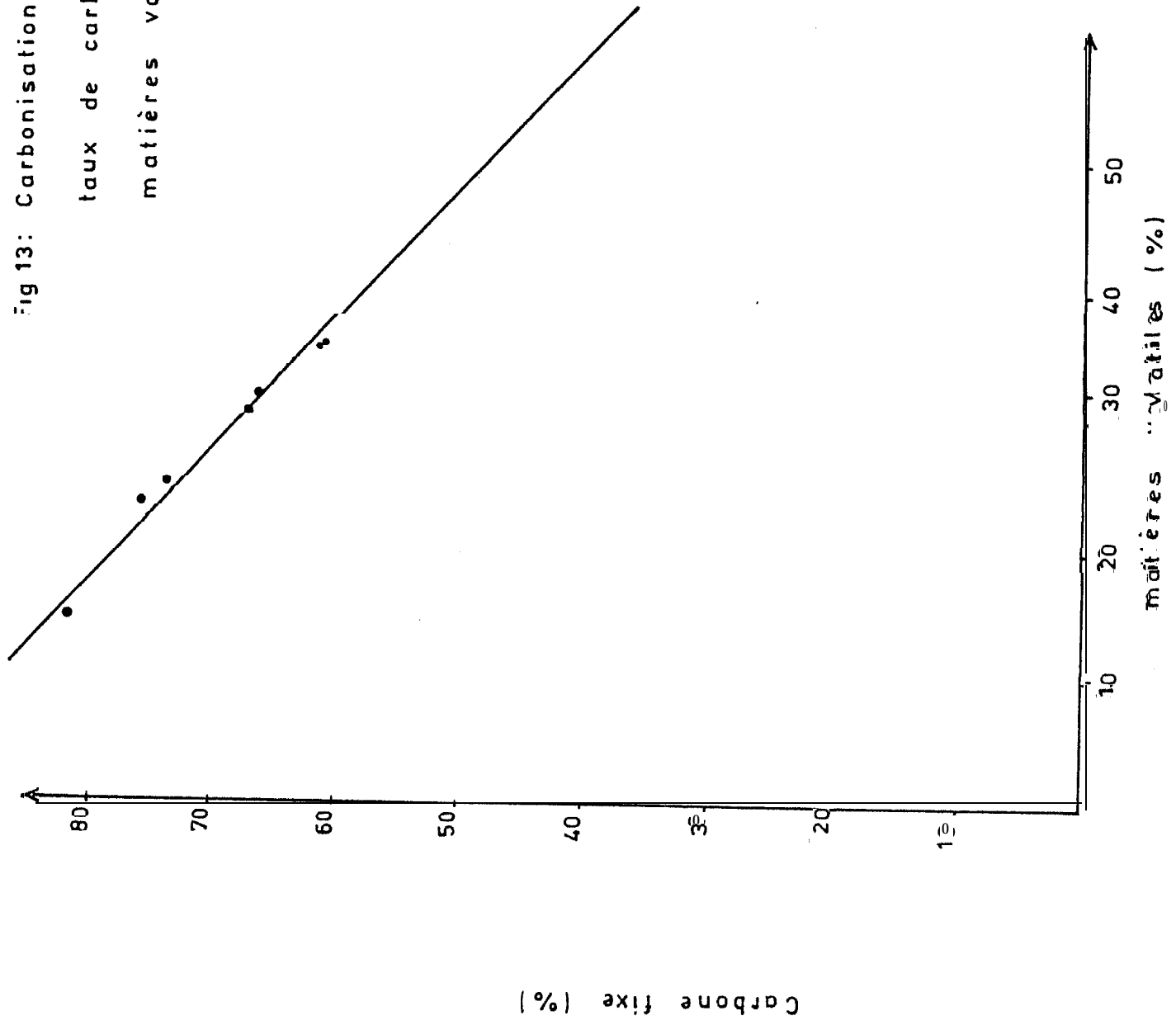


Fig 13: Carbonisation en four métallique variation du
 taux de carbone fixe en fonction du taux de
 matières volatiles du charbon.



Echelle

abs 1mm = 0,5%

ord 1mm = 0,5% | 51 |

Fig14 Carbonisation en four métallique transportable
 Variation du pouvoir calorifique supérieur du charbon
 en fonction du taux de matières volatiles.

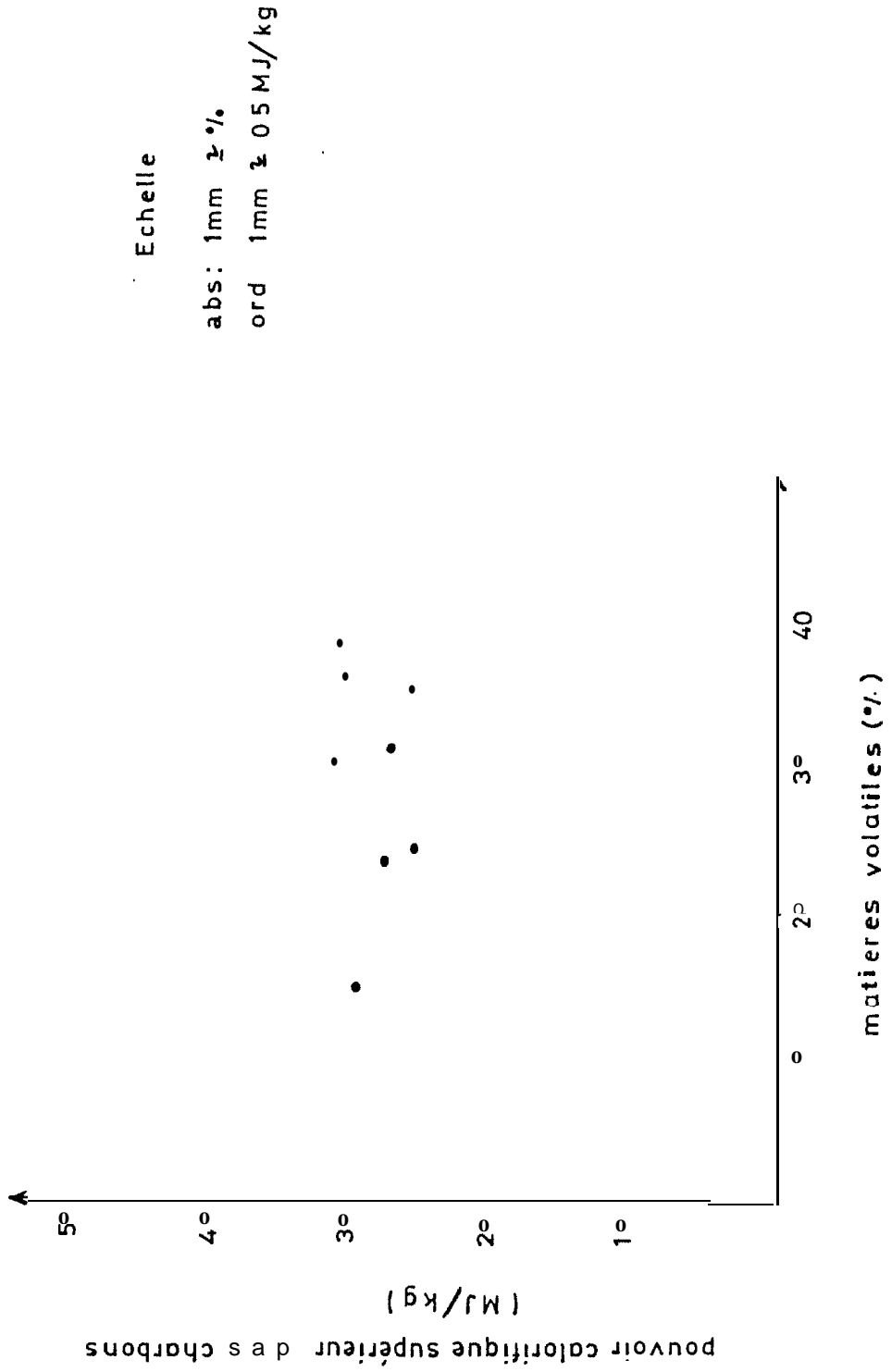


Fig 15: Carbonisation en four métallique
variation du taux de volatiles en
fonction de la température moyenne
de carbonisation.

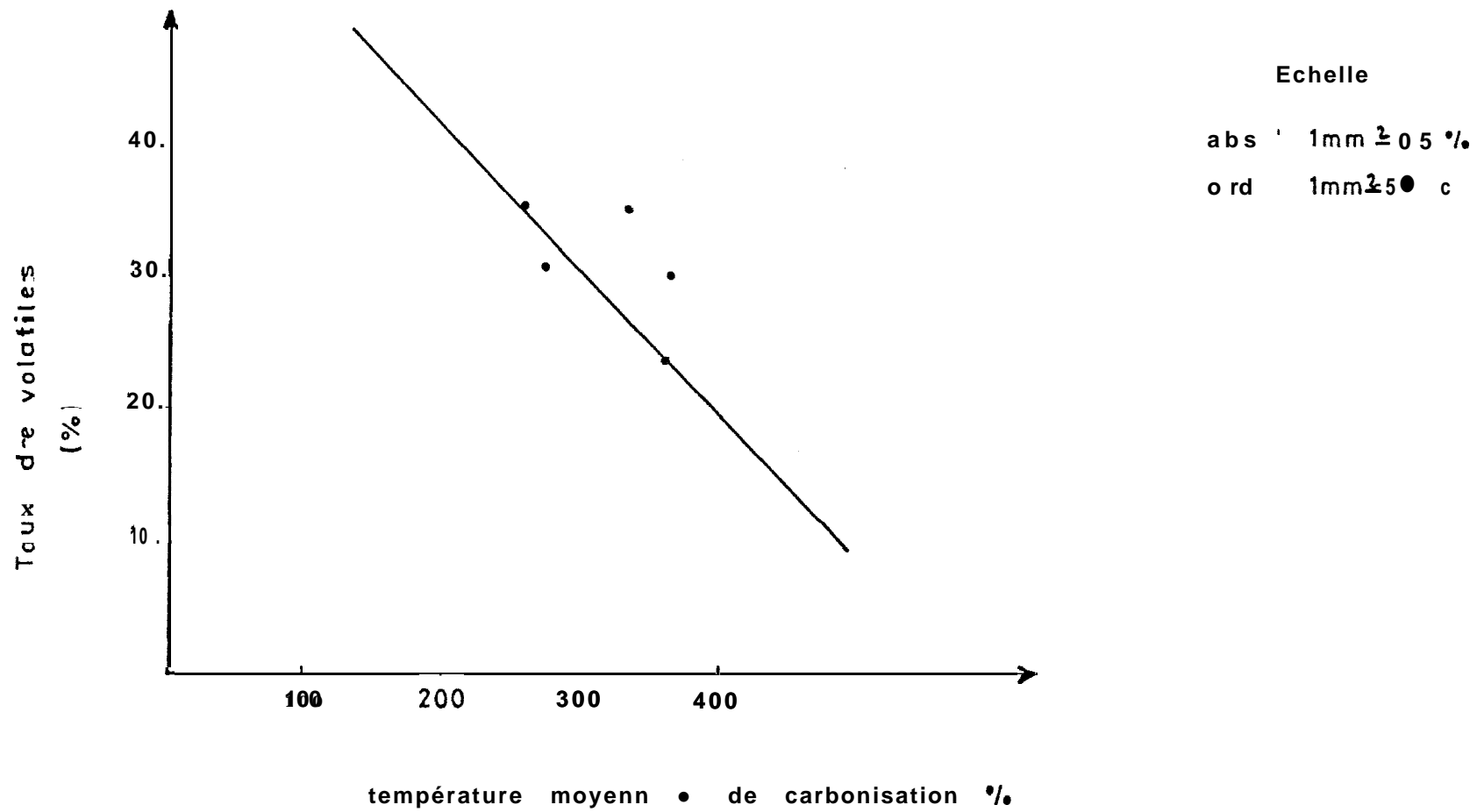


TABLEAU 7 : Analyse économique de la carbonisation de la tourbe et du bois en four métallique, meule casamançaise et meule traditionnelle.

| CARBONISATION | FOUR METALLIQUE | | MEULE CASAMANÇAISE | MEULE TRADITIONNELLE |
|--|-----------------|--------|--------------------|----------------------|
| | Tourbe | Dois | | |
| Pesée (h/ j) | 0,3 | 0,5 | 2,36 | 1,75 |
| Enfournement (h/ j) | 0,3 | 0,5 | 5,65 | 8,5 |
| Carbonisation (h/ j) | 3,5 | 1,0 | 9,36 | 8 15 |
| Refroidissement (h/j) | 0 | 0 | 6,0 | 6,0 |
| Défournement Mise en sac Pesée charbon (h/ j) | 0,5 | 0,8 | 9,0 | 6,0 |
| TOTAL | 4,6 | 2,8 | 32,37 | 37,25 |
| Quantité de charbon (Kg) | 1 199 | 480,5 | 1946,1 | 1372,0 |
| Prix de revient technique d'un kg de charbon | h/j | 0,0038 | 0,0058 | 0,016 |
| | F CFA | 4,86 | 7,39 | 21,10 |

h/j = homme/jour

Nous avons considéré qu'un manoeuvre travaille huit heures par jour et gagne 158,6 francs/heure (SMIG au Sénégal au 31 janvier 1985). Nous n'avons pas tenu compte des heures supplémentaires (heures de nuit), ni du coût des opérations effectuées en amont (extraction, transport et briquetage de la tourbe ; exploitation, transport et façonnage du bois) et, en aval, (transport et distribution du charbon).

Il est aussi bon de rappeler que nous n'avons considéré que le charbon directement commercialisable laissant le poussier sur place,

Si on tient compte de l'amortissement du four (am = 2,4 F.CFA), le prix de revient technique deviendra 7,26 F.CFA pour la tourbe et 9,79 F.CFA pour le bois. L'amortissement est obtenu à partir de la formule suivante :

$$am = \frac{\text{Prix du four (en F.CFA)}}{\text{durée de vie du four} \times \text{nombre de journées par semaine} \times \text{nombre de semaines de travail dans l'année} \times \text{ salaire journalier d'un manoeuvre}}$$

$$am = \frac{596.026}{2 \times 2 \times 49 \times 1.268,8} = 2,4 \text{ F.CFA}$$

On constate, d'après le tableau, que le nombre d'hommes/jour nécessaire pour une journée de carbonisation de tourbe (4,6) est supérieur à celui d'une journée de carbonisation de bois (2,8) mais le prix de revient technique d'un kilogramme de tourbe est inférieur à celui d'un kilogramme de bois (7,26 F.CFA contre 9,79 F.CFA) si on tient compte de l'amortissement du jour.

Pour une même matière première, le bois par exemple, le prix de revient technique d'un kilogramme de charbon, obtenu en four métallique, est trois fois inférieur à celui d'un charbon produit en meule casamançaise et presque cinq fois inférieur à celui de la meule traditionnelle.

TABLEAU 8 : Evolution de la température moyenne à l'intérieur de la charge en fonction du temps de carbonisation de différentes essences en four métallique transportable

| EMPS EN HEURES | EUCALYPTUS CAMALDULENSIS | | | Eucalyptus reticulata (4) | Prosopis (5) | Neem (6) |
|----------------|--------------------------|-----|-------|---------------------------|--------------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| 0 | 20 | 21 | 18,31 | 30 | 33 | 27 |
| 1 | 328 | 564 | 82 | 80 | 441 | 292 |
| 2 | 315 | 398 | 104 | 142 | 381 | 300 |
| 3 | 256 | 291 | 105 | 152 | 375 | 319 |
| 4 | 242 | 178 | 119 | 127 | 350 | 370 |
| 5 | 293 | 160 | 131 | 171 | 397 | 329 |
| 6 | 299 | 181 | 151 | 176 | 359 | 372 |
| 7 | 296 | 183 | 169 | 113 | 396 | 317 |
| 8 | 319 | 167 | 183 | 175 | 372 | 349 |
| 9 | 285 | 158 | 191 | 201 | 350 | 364 |
| 10 | 315 | 192 | 181 | 205 | 290 | 316 |
| 11 | 284 | 246 | 206 | 211 | 275 | 280 |
| 12 | 265 | 283 | 197 | 218 | 324 | 269 |
| 13 | 251 | 269 | 191 | 233 | 311 | 229 |
| 14 | 227 | 276 | 182 | 237 | 303 | 253 |
| 15 | 200 | 260 | 197 | 220 | 256 | |
| 16 | 201 | 228 | 192 | 225 | 228 | 195 |
| 17 | 221 | 217 | 189 | 235 | 254 | 168 |
| 18 | 236 | 238 | 172 | 250 | 205 | 147 |
| 19 | 247 | 257 | 171 | 272 | 165 | 178 |
| 20 | 282 | 255 | 167 | 320 | 144 | 116 |
| 21 | 270 | 263 | 168 | 360 | 126 | 104 |
| 22 | 317 | 240 | 174 | 340 | 114 | 105 |
| 23 | 287 | 257 | 176 | 295 | 101 | 94 |
| 24 | 332 | 253 | 185 | 250 | 93 | 83 |
| 25 | 328 | 230 | 189 | 222 | 77 | 83 |
| 26 | 320 | 206 | 204 | 220 | 70 | 75 |
| 27 | 285 | 175 | 218 | 231 | 65 | 70 |
| 28 | 323 | 159 | 241 | 241 | 60 | 71 |
| 29 | 360 | 144 | 204 | 241 | 55 | 67 |
| 30 | 357 | 136 | 231 | 237 | 51 | 60 |
| 31 | 355 | 126 | 227 | 230 | 49 | 58 |
| 32 | 304 | 119 | 208 | 249 | 46 | 57 |
| 33 | 274 | 104 | 178 | 226 | 44 | |
| 34 | 227 | 96 | 159 | 167 | 42 | |
| 35 | 200 | 86 | 138 | 160 | 41 | |
| 36 | 165 | 77 | 118 | 160 | 40 | |
| 37 | 127 | 71 | 99 | 170 | 38 | 42 |
| 38 | | 65 | 84 | 186 | 35 | 39 |
| 39 | 108 | 61 | 71 | 198 | 36 | 36 |
| 40 | 96 | 52 | 54 | 208 | 34 | 34 |
| 41 | 90 | 48 | 53 | 78 | 33 | 33 |

| | | | | | | |
|----|----|----|----|----|---|---|
| 42 | a0 | 47 | 47 | 78 | - | |
| 43 | 73 | 46 | 44 | 72 | - | |
| 44 | 68 | 44 | 40 | 64 | - | - |
| 45 | 62 | 43 | 36 | 63 | - | - |
| 46 | 64 | 39 | 34 | 62 | - | - |
| 47 | 68 | 38 | 35 | 61 | - | - |
| 48 | 73 | 37 | 33 | 60 | - | - |
| 49 | 64 | 35 | 32 | 53 | - | - |
| 50 | 61 | 33 | 31 | 47 | - | - |

On constate, d'après le tableau, que la carbonisation des essais 1,2,3 et 4 est plus longue que celle des essais 5 et 6.

En effet, pendant la carbonisation des essais 1 à 4, nous sommes intervenus régulièrement en ouvrant ou en fermant les vénets pour augmenter ou diminuer la température lorsque son évolution nous paraissait anormale, ce qui a pour conséquence d'allonger le temps de carbonisation.

Pour les essais 5 à 6 et même pour les six derniers effectués à Keur-Mactar, nous avons laissé la température évoluer toute seule, notre intervention se limitant à la réduction des entrées d'air, la nuit, lorsque la surveillance du four ne paraît plus nécessaire.

La deuxième méthode de suivi nous paraît plus raisonnable quand on sait qu'elle permet d'obtenir une évolution normale de la température en fonction du temps (Fig. 11) et raccourcit d'une façon assez substantielle le temps de carbonisation (*Prosopis, Neem*).

TABLEAU 9 : Carbonisation de la tourbe - Evolution de la température à l'intérieur de la charge en fonction du temps (deuxième essai).

| TEMPS EN HEURES | N° DES SONDES | | | | | | T.M. |
|--------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 0 | début allumage | | | | | | |
| ± I.T. 1 | 51,5 | 74,5 | 67,5 | 60,6 | 58,5 | 49,8 | 49,9 |
| | | | | 67,8 | 66,2 | 67,8 | 71,48 |
| 3 | 58,9 | 78,2 | 72,8 | 67,8 | 66,2 | 84,9 | 71,46 |
| 4 | 50,1 | 64,4 | 67,7 | 66,5 | 67,7 | 104,2 | 70,10 |
| 5 | 64,7 | 65,8 | 73,5 | 70,1 | 73,2 | 137 | 80,71 |
| 6 | 67,8 | 69,4 | 76,3 | 72,8 | 75,1 | 171,3 | 88,78 |
| 7 | 71,3 | 77,6 | 78,5 | 80,8 | 75,4 | 207 | 98,44 |
| 8 | 76,3 | 81 | 82,3 | 90,4 | 76,6 | 203 | 101,6 |
| 9 | 95,6 | 82 | 90,8 | 98,6 | 77,4 | 192 | 106 |
| 10 | 88,3 | 85,5 | 102,5 | 114,9 | 81,2 | 128 | 100 |
| 11 | 71,3 | 91,5 | 113,9 | 126,4 | 88 | 204 | 115,8 |
| 12 | 70,2 | 99,2 | 127,4 | 140,8 | 96 | 212 | 124,2 |
| 13 | 166,3 | 108,4 | 148,3 | 151,2 | 115,1 | 200 | 148,2 |
| 14 | 136,9 | 112,2 | 157,9 | 179,2 | 125,6 | 188 | 149,9 |
| 15 | 82,9 | 115,6 | 185,8 | 194,1 | 140,2 | 186 | 150,76 |
| 16 | 82,5 | 133,5 | 193,6 | 209 | 165,8 | 200 | 164,06 |
| 17 | 83,8 | 147,6 | 138,7 | 225 | 186,6 | 190,7 | 162 |
| 18 | 92,1 | 169,9 | 157,7 | 261 | 221 | 219 | 186,7 |
| 19 | 93,7 | 190,4 | 177,6 | 285 | 224 | 224 | 199 |
| 20 | 93,4 | 201 | 179,9 | 287 | 237 | 228 | 204,38 |
| 21 | 95,7 | 224 | 202 | 292 | 236 | 228 | 212,95 |
| 22 | 99,1 | 251 | 232 | 297 | 240 | 236 | 225,85 |
| 23 | 94,4 | 272 | 266 | 330 | 347 | 243 | 258,73 |
| 24 | 100,9 | 301 | 297 | 338 | 357 | 236 | 271,65 |
| 25 | 113,2 | 326 | 320 | 359 | 237 | 231 | 267,36 |
| 26 | 188,1 | 355 | 342 | 385 | 352 | 233 | 309,18 |
| 27 | 203 | 390 | 361 | 421 | 368 | 245 | 331,33 |
| 28 | 174,4 | 411 | 395 | 433 | 552 | 230 | 365,9 |
| | Arrêt de la carbonisation | | | | | | |
| 29 | 197 | 437 | 413 | 494 | 562 | 286 | 398 |
| 30 | 188 | 382 | 422 | 505 | 502 | 283 | 418 |
| 31 | 175,9 | 303 | 408 | 436 | 383 | 254 | 326 |
| 32 | 161,8 | 253 | 371 | 355 | 306 | 226 | 278,80 |
| 33 | 140,5 | 218 | 334 | 286 | 254 | 196,4 | 238 |
| 34 | 135,7 | 191,3 | 298 | 233 | 214 | 171,9 | 207,65 |
| 35 | 123,1 | 169,8 | 271 | 199 | 188 | 153,4 | 184 |
| 51 | 56 | 60,8 | 65,4 | 66,3 | 74,7 | 58,9 | 63,68 |
| 52 | 61,7 | 63,8 | 69 | 70,8 | 81,1 | 61,4 | 67,9 |
| 53 | 59,6 | 59,2 | 65 | 67,8 | 77,4 | 59,4 | 64,73 |
| 54 | 57,5 | 50,5 | 58,2 | 53,4 | 52,5 | 52,5 | 54 |
| 55 | 56,8 | 47,6 | 61,9 | 52,6 | 59,4 | 50 | 54,71 |

I.T. = Inversion Tirage

T.M. = Température Moyenne

TABLEAU 10 : Evolution de la température moyenne à l'intérieur de la tige et sur les parois externes du four en fonction du temps de carbonisation

| TEMPS N HEURES | TEMPERATURE MOYENNE A L'INTERIEUR DE LA CHARGE | TEMPERATURE MOYENNE SUR LES PAROIS EX- TERNES DU FOUR |
|-------------------|--|---|
| 0 | 27 | 39,12 |
| 1 | 292 | 95 |
| 2 | 300 | 110 |
| 3 | 319 | 135 |
| 4 | 370 | 137 |
| 5 | 329 | 140 |
| 6 | 322 | 136 |
| 7 | 317 | 143 |
| 8 | 349 | 135 |
| 9 | 364 | 137 |
| 10 | 316 | 141 |
| 11 | 280 | 152 |
| 12 | 269 | 152 |
| 13 | 228 | 135 |
| 14 | 253 | 125 |
| 15 | A r r ê t d e c a r b o n i s a t i o n : | |
| 16 | 195 | 92 |
| 17 | 168 | 72 |
| 18 | 147 | 61 |
| 19 | 128 | 56 |
| 20 | 116 | 58 |
| 21 | 104 | 55 |
| 22 | 105 | 42 |
| 23 | 94 | 40 |
| 24 | 83 | 44 |
| 25 | 83 | 44 |
| 26 | 75 | 48 |
| 27 | 70 | 46 |
| 28 | 71 | 36 |
| 29 | 67 | 31 |
| 30 | 60 | 31 |
| 31 | 58 | 30 |
| 32 | 57 | 27 |
| 37 | 42 | 26 |
| 38 | 39 | 25 |
| 39 | 36 | 25 |

coefficient de corrélation : $r = 0,95$

Il existe une bonne corrélation entre la température à l'intérieur de la charge et celle des parois externes du four.

Rappelons que la température des parois externes a été déterminée grâce à un thermomètre à infrarouge.

Fig 16: Carbonisation de bois en four métallique transportable.

Evolution de la température moyenne à l'intérieur de la charge sur les parois du four en fonction du temps (Neem)

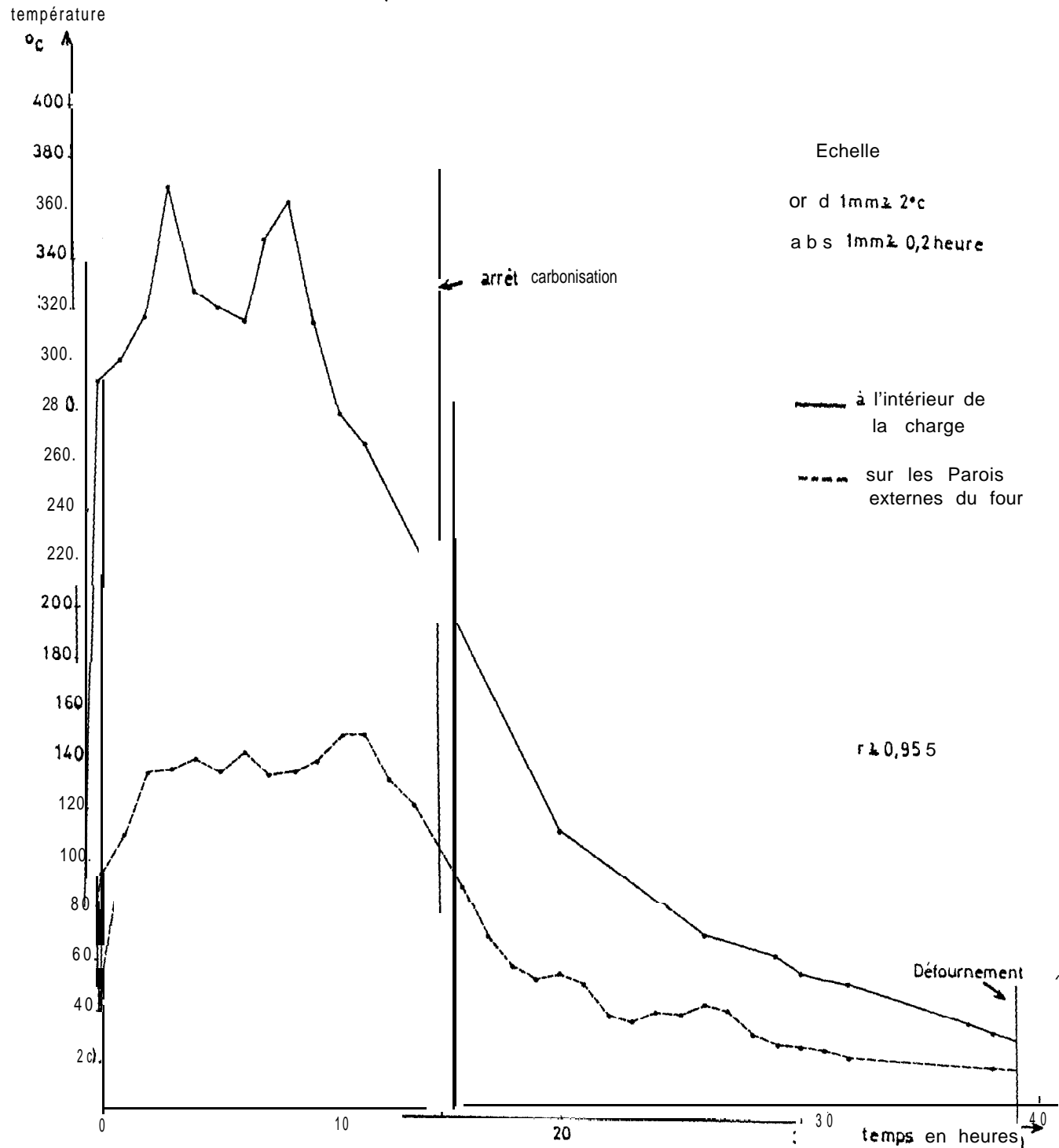


Fig 17: Carbonisation en four métallique transportable

Evolution de la température moyenne à l'intérieur de la charge en fonction du temps (Tourbe)

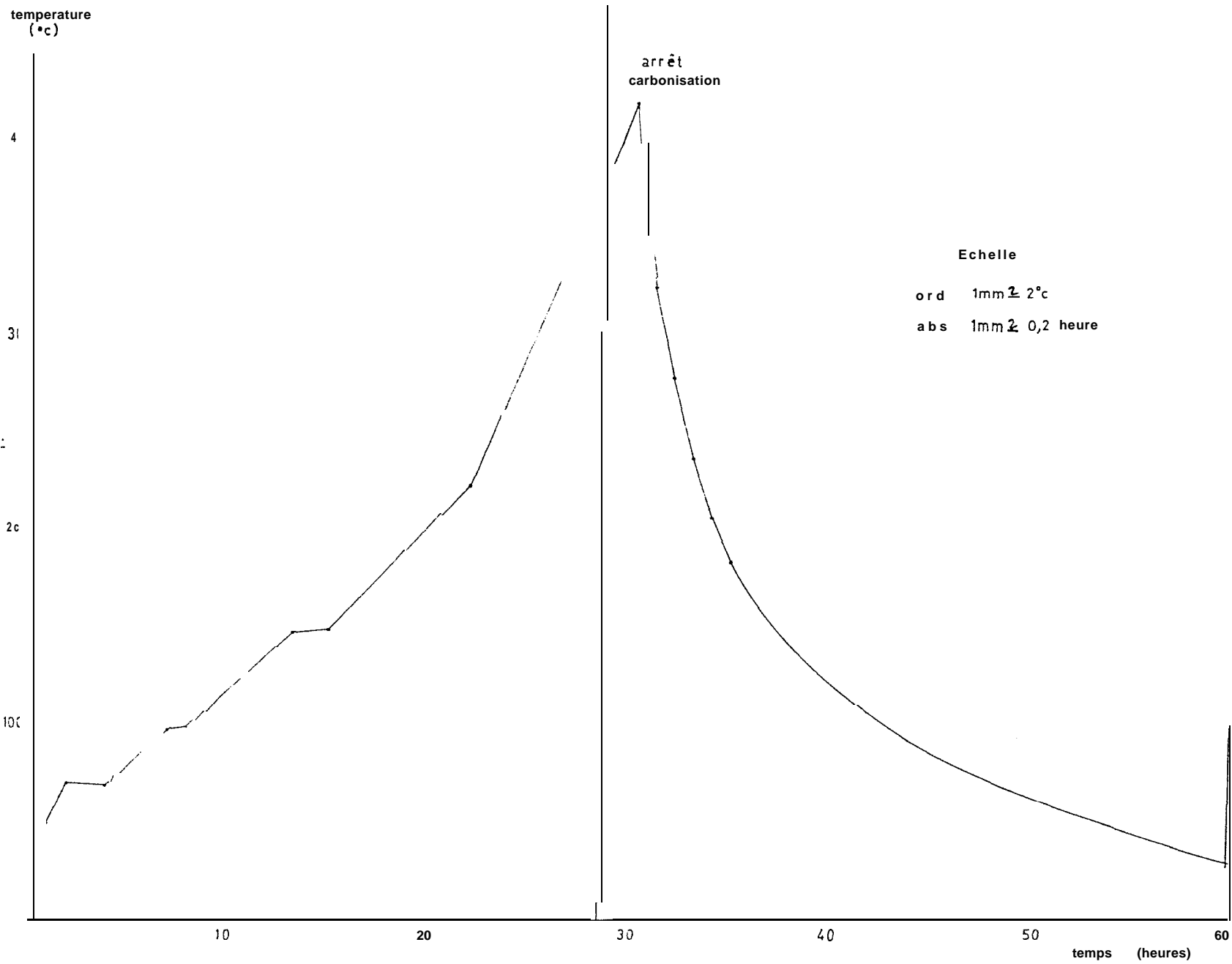
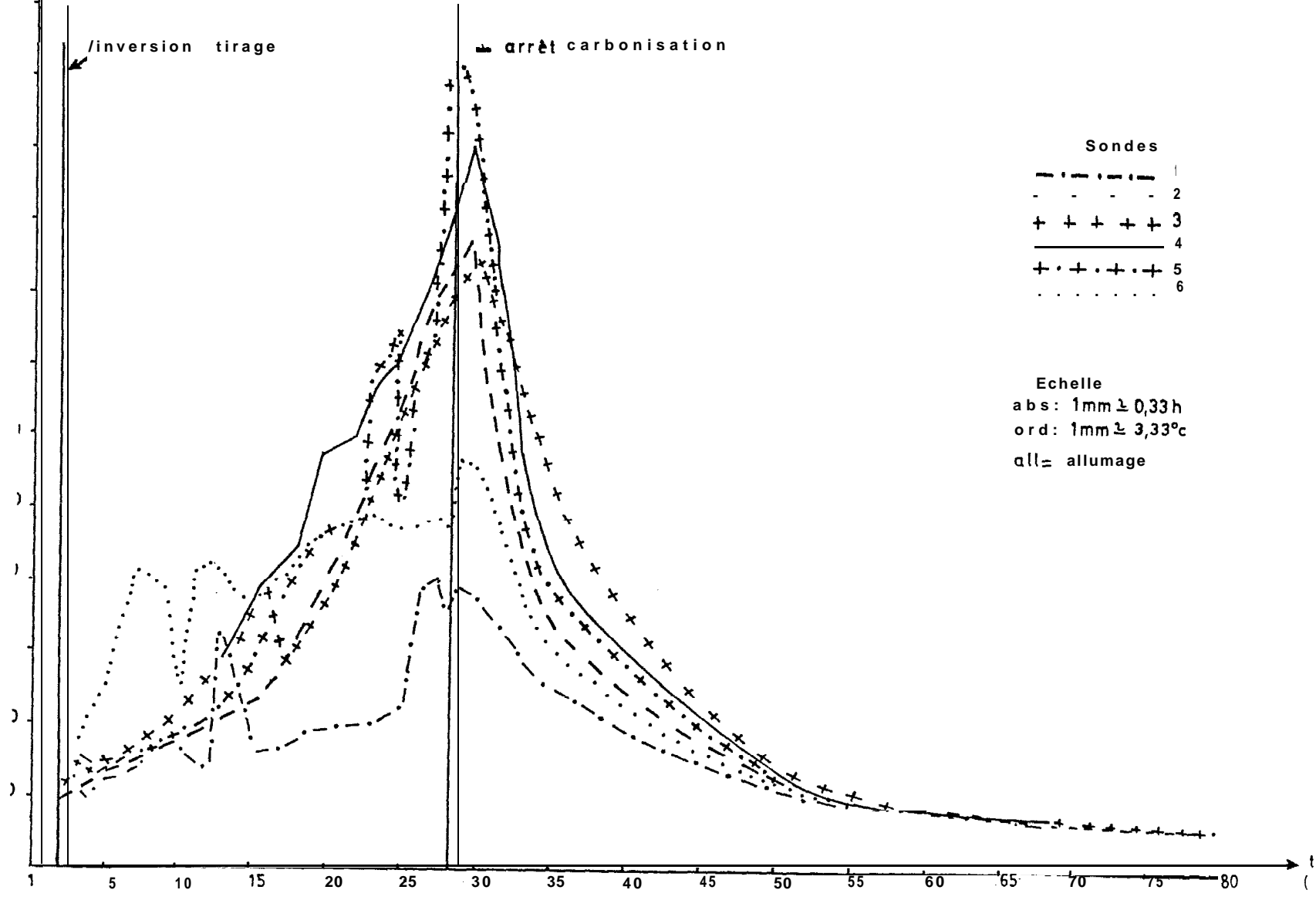


Fig 18: Carbonisation de la tourbe en four métallique transportable:

Evolution de la température en fonction du temps de carbonisation (deuxieme essai)



13.2 - INTERPRETATION DES RESULTATS

13.21 - Rendement pondéral sur matière anhydre et rendement énergétique à la carbonisation.

L'observation du tableau 3 et des figures 11 et 12 montre que les rendements pondéraux sur matière anhydre et énergétique sont une fonction décroissante de l'humidité.

En effet, lors de la carbonisation par combustion partielle, une partie de la charge est brûlée pour sécher et amener à la décomposition la matière première à carboniser. Ainsi, plus celle-ci sera humide, plus la quantité de combustible utilisé pour évaporer l'eau sera grande et plus les rendements pondéral et énergétique seront faibles. Pour limiter les pertes d'énergie par combustion, il sera plus intéressant de carboniser du bois sec. Or, le séchage de certaines essences locales, telles que *Prosopis juliflora* et tous les Acacia rencontre un certain nombre de contraintes, à savoir leur attaque par les insectes et les champignons à un degré de siccité relativement bas. Il faut alors dans ce cas trouver un compromis entre les pertes dues aux attaques et les pertes par combustion si le bois est carbonisé à l'état partiellement vert.

Le rendement pondéral moyen (27,6 %) est satisfaisant pour un procédé de carbonisation par combustion partielle.

Si les résultats de la carbonisation de l'*Eucalyptus tereticornis* quant aux rendements pondéral et énergétique, se confirmaient, cela signifierait que la carbonisation en meule casamançaise est une carbonisation lente (4 jours), bien maîtrisée par les deux opérateurs qui sont d'anciens charbonniers formés par la suite à l'Ecole des Agents Techniques. Cela pourrait également s'expliquer par la petite taille de la meule (15 stères), or, d'après les enseignants de la carbonisation à l'EATEF, la taille d'une meule casamançaise doit varier entre un minimum de 20 stères et un maximum de 100 stères.

On notera enfin que l'influence de l'espèce sur les rendements matière et énergétique a été largement dominée par l'effet de l'humidité du bois initial. Le rendement pondéral (sur matière anhydre) moyen (45,3 %) pour la tourbe, nettement supérieur à celui du bois (27,6 %), peut s'expliquer par la présence d'une quantité très importante de matières minérales dans la tourbe.

La présence de résidu métallique (Tab. 4) serait le résultat d'une réaction, à haute température, du soufre contenu dans la tourbe en présence d'oxygène. Ce résidu métallique se forme préférentiellement au niveau des entrées d'air. Le faible pourcentage de pyroligneux (0,8) est dû à la structure des cheminées: Ces dernières ne présentant pas de chicane pour faciliter la condensation des gaz.

13.22 • Caractéristiques physico-chimiques du produit final

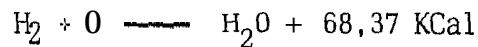
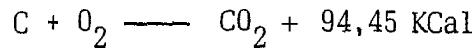
Le fait que les charbons de *Prosopis* et de *Neem* soient plus denses que ceux des *Eucalyptus* (Tab. 5) confirme l'hypothèse selon laquelle les bois denses donnent en général des charbons denses.

Si on tient compte des erreurs d'échantillonnage, de manipulations et du petit nombre d'essais, on peut constater, d'après le tableau 5, que le taux de matières volatiles est négativement corrélé à la température moyenne de carbonisation (Fig. 15), contrairement au taux de carbone fixe.

En effet, quand la température moyenne de carbonisation augmente, la quantité de matières volatiles éliminée augmente, ce qui améliore le pourcentage de carbone fixe contenu et, partant, le pouvoir calorifique. Mais on constate (Tab. 5) que des charbons ayant un très bon pourcentage de carbone fixe (*Neem*) ont le même pouvoir calorifique que les charbons à faible taux de carbone fixe ^{et} très fort pourcentage de volatiles (*Eucalyptus camaldulensis* n° 3 et *Eucalyptus tereticornis*).

Ce phénomène assez bizarre trouve cependant une explication très juste : celle avancée par A. MAYER dans son étude "Charcoal from portable Kils and fixed installations" selon laquelle un charbon à fort pourcentage de matières volatiles aura un *PCS* sensiblement égal à celui d'un charbon à fort pourcentage

de carbone du fait de la grande différence fournie par la combustion du carbone et de l'hydrogène :



1 gramme de carbone produit 7,9 KCal contre 34,0 KCal pour 1 gramme d'hydrogène

La supériorité du pouvoir calorifique du charbon d'*Eucalyptus tereticornis* produit en four métallique par rapport à celui produit en meule casamançaise pour trouver ici son explication.

Pour une même température de carbonisation (360°C), le charbon de Neem contient beaucoup moins de matières volatiles (14,8 %) que ceux de l'*Eucalyptus tereticornis* (30,1 %) et de l'*Eucalyptus camaldulensis* (24,5 %). Cela voudrait dire que le Neem produit un charbon à faible taux de matières volatiles (ce qui doit être confirmé par la multiplication des essais sur le Neem) ou qu'on a prélevé et analysé des échantillons carbonisés à une température supérieure à 360°C à l'intérieur de la charge.

13. 23 - Analyses économiques

Pour une même technique de carbonisation (four métallique par exemple), le nombre d'hommes/jour nécessaire pour une fournée de bois (2,8) est inférieur à celui d'une fournée de tourbe (4,6) mais le prix de revient technique d'un kilogramme de charbon de bois (7,39 F.CFA) est plus élevé que celui d'un kilogramme de charbon de tourbe (4,36 F.CFA).

Ces résultats peuvent s'expliquer par l'inertie de la tourbe qui allonge considérablement le temps de carbonisation (72 heures contre 48 heures pour bois) et le pourcentage assez important de matières minérales contenues dans la tourbe.

En effet, pour une même quantité volumique de matière première, on a l'impression que la fournée de tourbe fournit deux fois plus de charbon que celle du bois (1 199 kg contre 480,5 kg pour le bois]. Il se trouve cependant qu'on obtient généralement la même quantité volumique du charbon.

Lors de la carbonisation de la tourbe, le sable contenu dans la matière première ne bouge pas, mais sa concentration augmente dans le produit final. Ainsi, le taux de cendres (Tab. 4) passe du simple (14,37 %) au double (33,3 %) après la carbonisation.

Il faut noter que si on prenait en compte, dans les calculs économiques, du coût des opérations en amont de la carbonisation (extraction et briquetage de la tourbe), le prix de revient technique d'un kilogramme de charbon tourbe serait sans nul doute supérieur à celui du charbon de bois, quelle que soit la quantité de matières minérales contenue dans la matière première.

Si on considère séparément les trois techniques de carbonisation testées, on constate que le prix de revient d'un kilogramme de charbon de bois produit en four est beaucoup plus bas que celui des deux méthodes traditionnelles. Cela est dû au fait que la carbonisation par méthode traditionnelle nécessite une surveillance permanente de jour et de nuit et un très grand savoir faire, contrairement à celle du four métallique.

Le prix de revient d'un kilogramme de charbon produit en four pourrait être réduit d'une façon assez substantielle en utilisant de la tôle moins épaisse donc moins chère et plus maniable et/ou en combinant trois ou quatre fournées au niveau d'une unité de production.

13.24 ■ Evolution de La température en fonction du temps

On constate pour la tourbe (Fig. 13), une augmentation régulière de la température aussitôt après allumage. Elle passe par un maximum (température moyenne de carbonisation) puis commence à baisser jusqu'à refroidissement total (25 à 30°C).

Dans le cas du bois (Fig. 16), la courbe présente deux maxima séparés par un creux. Le premier maximum (370°C) correspondrait à la phase de combustion et le deuxième à la phase de carbonisation proprement parlée (phase exothermique). Le creux qui sépare les deux pics serait le résultat de la baisse de la température lors de la phase endothermique.

Comme il a été annoncé plus haut (Chap. II, Tab. 2), la carbonisation du bois se fait en quatre étapes : la combustion, la déshydratation, la carbonisation et le refroidissement.

Dans le cas de la tourbe (Fig. 17), ces phénomènes sont beaucoup moins marqués. En effet, les phases de combustion et de déshydratation sont pratiquement confondues et il n'apparaît qu'un seul pic correspondant à la phase de carbonisation. Ce phénomène serait dû :

- à l'inertie et la compacité des briquettes de tourbe qui font que la température ne peut pas se propager à l'intérieur de la charge aussitôt après allumage
- au fait que les sondes étaient placées au même niveau (à 1 m) dans le sens du rayon du four.

Nous retiendrons surtout la première hypothèse car le tracé des courbes des six sondes prises séparément (Fig. 18) montre des phases de combustion et des phases endothermiques assez timides, L'évolution assez lente de la température et les phases de carbonisation et de refroidissement, beaucoup plus longues pour la tourbe que pour le bois, viennent confirmer cette même hypothèse.

Il faut, enfin, noter qu'il existe une bonne corrélation ($R = 0,95$) entre la température à l'intérieur de la charge et celle des parois externes du four dans le cas de la carbonisation du bois (Fig. 16, Tab.10).

Chapitre **IV**

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES DE RECHERCHES

1 - CONCLUSIONS GENERALES

La carbonisation en four métallique présente un certain nombre d'avantages techniques et socio-économiques. En effet, contrairement aux méthodes traditionnelles et traditionnelles améliorées (meule casamançaise), la carbonisation en four métallique ne demande pas un très grand savoir faire et peut être mise en veilleuse la nuit. Cette présence nocturne, non obligatoire, peut diminuer sensiblement les coûts de la main d'oeuvre et par là le prix de revient du kilogramme de charbon (4,86 contre 21,34 et 34,45 F.CFA) respectivement pour la meule casamançaise et la meule traditionnelle. Il en est de même du cycle de carbonisation considérablement raccourci : 48 heures et 72 heures pour le bois et la tourbe contre 1 à 2 semaines pour les méthodes traditionnelle et casamançaise.

Le rendement moyen sur matière anhydre (27 %) est assez satisfaisant pour une carbonisation par combustion partielle. Le rendement énergétique est faible (28,1 %) pour le bois partiellement vert mais assez raisonnable pour le bois sec (50,2 %). Si les résultats obtenus sur *Eucalyptus tereticornis*

aux Bayot se confirmaient, le rendement serait légèrement inférieur à celui de la meule casamançaise du fait de la durée assez courte de la carbonisation.

Un avantage, et l'un des plus importants, est la suppression quasi-totale des accidents <inhérents à la carbonisation en meule, à savoir les effondrements, les projections de flammes entraînant des brûlures graves et la combustion du charbon lors du défournement.

La carbonisation en four produit un charbon à fort taux de matières volatiles (28,7 % en moyenne) et à pouvoir calorifique moyen (29 MJ/Kg). Ce charbon est bien indiqué pour un usage domestique parce qu'il est facilement inflammable et peu friable. Elle rencontre cependant un certain nombre de contraintes, à savoir la nécessité de disposer de fonds pour la confection et l'entretien de ce dernier, l'impossibilité de carboniser le bois de très gros diamètre, à moins de le fendre ce qui peut augmenter le coût de la main d'oeuvre, son transport surtout dans les zones d'accès difficile.

L'étude de l'évolution de la température en fonction du temps, bien que n'ayant pas apporté grand chose dans l'amélioration des rendements, a permis de connaître les différentes phases d'une carbonisation et de juger de la qualité physico-chimique du produit final.

Compte tenu du prix excessif du four par rapport au budget de nos charbonniers (pour qui le plus souvent la production de charbon est une activité de subsistance), l'introduction du four métallique pour la carbonisation du bois en remplacement de la meule ne sera pas chose facile, malgré les multiples avantages cités plus haut. Cela est d'autant plus vrai que ceux qui détiennent actuellement le monopole de l'exploitation et de la distribution du charbon ne trouveront pas plus d'intérêt à recruter des charbonniers utilisant les méthodes traditionnelles que de s'orienter vers des techniques plus coûteuses parce que demandant un investissement au départ.

L'utilisation des fours métalliques dans la carbonisation du bois au Sénégal ne pourra être envisageable que dans le cadre de regroupement de charbonniers à la fois exploitants que l'Etat ou tout autre organisme financier national ou international pourra aider à se procurer des moyens de production. Ces charbonniers exploitants étant, tout au moins, les premiers bénéficiaires des avantages techniques sociaux que procurent cette méthode. Dans ce cas, les exploitants actuels qui surexploitent les charbonniers (raison pour laquelle le charbon n'est pas vendu à son prix technique) ne serviront plus que d'intermédiaires entre les charbonniers exploitants et les détaillants en ville.

Dans le cas de la tourbe, compte tenu de la compacité des briquettes et de leur inertie, de la quantité très importante de bois à brûler pour démarrer la meule, le four métallique restera la méthode la mieux indiquée pour sa carbonisation.

2 - PERSPECTIVES DE RECHERCHES

Dans le cadre du futur programme biomasse-énergie, nous envisageons de mener des recherches sur la valorisation et les qualités énergétiques de la biomasse (bois, tourbe, pailles, déchets animaux et végétaux).

Dans la valorisation, on s'intéressera à la combustion, la carbonisation, à la pyrolyse gazéification, à l'hydrolyse, à l'hydroliquéfaction et la fermentation. L'étude des qualités énergétiques nous amènera à déterminer les caractéristiques physico-chimiques de la matière première (pouvoir calorifique, matières volatiles, taux de cendres, carbone fixe, etc.) avant et après carbonisation.

A court et moyen terme :

- entamer des recherches sur les méthodes traditionnelles de carbonisation en vue de leur amélioration. Ces recherches porteront spécialement sur l'aspect technique et socio-économique, mais également sur les résultats obtenus (rendement pondéral sur matière anhydre et rendement énergétique, propriétés physico-chimiques du produit final). Parallèlement aux recherches sur le terrain, des travaux de laboratoire doivent être menés. Ils consisteront à déterminer la composition chimique de la matière première, souvent corrélée au rendement matière ;
- entamer des recherches systématiques sur les caractéristiques énergétiques (PCS, volatiles, cendres, etc.) de tous les bois de forêt naturelle ou de plantation artificielle ainsi que de la tourbe. Pour cela il faut nécessairement disposer d'un four électrique à programmation de température où tous les paramètres de la carbonisation sont contrôlés. Ce four permet de comparer entre elles sans grand risque d'erreur les caractéristiques énergétiques de plusieurs essences. Les résultats obtenus pourraient guider le sylviculteur sur le choix de telle ou telle autre essence à utiliser pour un reboisement et/ou un aménagement de type énergétique.

Compte tenu du coût élevé du matériel nécessaire pour mener à bien de tel les recherches, la collaboration avec un laboratoire de chimie serait souhaitable.

A long. terme, des recherches sur d'autres techniques de transformation pourraient être envisagées, notamment :

- . l'hydrolyse pour la production d'éthanol
- . l'hydroliquéfaction pour la production d'huile
- . pyrolyse-gazéification pour la production de méthanol
- . fermentation pour la production de biogaz
- . torréfaction pour la production de bois torréfié.

▪ LISTE BIBLIOGRAPHIQUE ▪

- (1) - A., THIAM, 1984
Filière **bois** et charbon de bois au Sénégal : etude de cas
Programme Energie ENDA, Mars 1984
- (21) - B., NDOUR, 1984
Carbonisation de deux essences sénégalais : E. microtheca et A. seyal -
Influence de la température de pyrolyse en fonction sur les produits
obtenus - Mémoire de DEA - Université de NANCY I - Octobre 1984
- (3) - B., NDOLJR et E., SALL, 1985
Carbonisation de la tourbe en four métallique transportable
CTS/CNRF/ISRA, janvier 1985
- (4) - C. WANE, 1985
Le bois au-delà de la crise de l'énergie
Bois de feu information n° 12 - 1er trimestre 1985
- (51) - D., BRIANI et J. DOAT, 1985
Guide technique de la carbonisation : la fabrication du charbon de bois
EDISUD 1985
- (6) - FAO, 3984
Techniques simples de carbonisation
Etude FAO : Forêts - 41 -
- (73) - FAO, 1985
Rapport de la consultation technique sur la recherche et le développement
dendro-énergétique en Afrique
Addis-Abeba, Ethiopie, 27-30 novembre 1984
- (8) - G. PEZERIL ; M.D. SECK ; C.E.W. DIOP ; C. FAYE ; E.H. SALL ; A. SARR et
J.J. CHATEAUNEUF, 1984
Rapport de synthèse géologique - Prospection générale et certification des
réserves - Projet d'exploitation des Tourbes des Niayes
CTS/BRGM/DMG/FAC - Janvier 1984.
- (9) - G. FOLEY et A. VAN BUREN, 1981
Energie et forêt : la houille et autres solutions possibles au problème
des combustibles ligneux
UNASYLVA, vol. 32, n° 130
- (10) - H.E., BOOTH , 1981
Les réalités de la carbonisation
UNASYLVA, vol. 33, n° 131
- (11) - I.S., GOLDSTEIN, 1978
La chimie du bois
VIIIème Congrès forestier mondial, Djakarta, octobre 1978
- (12) - J. DOAT, A. CARTINO, G. PETROFF, 1979
Les forets tropicales et l'énergie
Bois et forêts des tropiques n° 184 ; mars-avril 1979

- (14) - J. DOAT, 1983
 Etude de la tourbe et du bois fossile du Sénégal
 CTFT - Division Cellulose-Chimie-Energie
 Novembre 1983
- (15) - J.F. MOLLE, 1979
 Les potentialités de la biomasse au Sénégal
 Compte rendu de mission au Sénégal du 7 au 25 août 1979
 CNEEMA.
- (16) - SIPILA, K., ARPIAINEN, W, et EKMAN, E.
 Small-scale charcoal production from sod peat for developong countries
 Technical Research Centre of Finland
 Fuel and Lubricant Research Laboratory 02150 Espoo 15, Finland
- (17) - M. RLJPERT, 1980
 Cours de carbonisation
 Ecole des Agents Techniques des Eaux & Forêts de Djibélor
- (18) - M. ANDRE, 1970
 Charcoal from portable kilns and fixed installations
 Ouganda, 1970
- (19) - M. HARCHICH et M. HATLI, 1983
 Carbonisation en laboratoire d'un Eucalyptus camaldulensi
 Mémoire de fin d'étude-- Ecole supérieure du bois - Paris
- (20) - P.A. JAYET, 1982
 Pyrolyse du bois sec : réacteur à lit fixe, résultats sur pilote et
 modélisation
 Thèse de Doctorat de 3ème cycle - Ecole des Mines de Paris
- (21) - P. MONTAGNE, 1984
 Consommation de combustible ligneux et les foyers améliorés au SRI-LANKA
 Bois de feu information n° 11 - Octobre-novembre 1984
- (22) - S. DIENG, A. MBOW, J.P. JOREZ, 1984
 Le point sur les foyers améliorés et le programme tourbe au GERER
 Bois de feu information n° 10 - juillet-août 1984
- (23) - X. DEGLISE, 1982
 Les conversions thermochimiques du bois
 Revue Forestières Française n° 4 - 1982
- (24) - Y. SCHOWOB
 La carbonisation du bois
 Biomasse actualité n° 4

A N N E X E I

TECHNIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES CHARBONS

La détermination des caractéristiques physico-chimiques des charbons peut être effectuée selon les modes opératoires suivants :

1 - DENSITE

La densité réelle des charbons est déterminée suivant les prescriptions de la norme française d'essai des bois n° B.51.005 sur des éprouvettes de charbon de 2 à 6 cm³. Le volume mesuré à l'aide d'un volumètre à mercure donnant une précision de 2 mm³ et le poids sur une balance donnant une précision d'un centigramme.

2 - MATIERES VOLATILES

On détermine les taux de matières volatiles après dix minutes à 900°C au four à moufle en creuset en silice avec couvercle. Le résultat est exprimé en % du charbon sec. Pour cet essai, le charbon est fractionné mécaniquement et l'échantillon utilisé pour le dosage correspond à la fraction retenue sur un tamis de 2 mn d'ouverture de maille passant au travers d'un tamis de 3,5 mm d'ouverture de maille.

3 - CENDRES TOTALES (matières minérales)

Incineration à 815°C et pesée du résidu.

4 - CARBONE FIXE

Le carbone fixe est calculé en faisant la différence entre 100 et la somme : matières volatiles + cendres,

5 - POUVOIR CALORIFIQUE SUPERIEUR

Le pouvoir calorifique supérieur (*pcs*) est mesuré à l'aide d'une bombe calorifique sur environ 1 g d'échantillon séché à l'étuve et fractionné en petits morceaux. L'échantillon est placé dans une bombe en acier inoxydable remplie d'oxygène à 30 bars. La bombe est immergée dans un vase calorimétrique rempli d'eau lui-même placé dans un calorimètre adiabatique. Un thermomètre de précision plongé dans cette eau. Un dispositif de régulation de température maintient la température de l'enceinte extérieure du calorimètre à celle de l'eau du vase calorimétrique (ceci assure l'adiabacité du dispositif). Après la mise à feu et l'équilibrage de l'ensemble, on détermine l'élévation de la température sur un thermomètre de précision à 0,005°C près (soit Δt).

$$pcs = \frac{M \times \Delta t}{m}$$

m = poids de l'échantillon

$$\Delta t = t_f - t_i$$

M = valeur en eau calorimètre ; elle est déterminée généralement avec de l'acide benzoïque rigoureusement pur, de pouvoir calorifique connu (6319 Kcal/kg).