2927

TECHNIQUES SIMPLES DE CARBONISATION

Chapitre 5

CHARBONNIERES EN FOSSE

L'emploi de la terre comme écran isolant pour éviter l'entrée de l'oxygène et des pertes de chaleur excessives est le système de carbonisation le plus ancien, qui remonte certainement à la nuit des temps, et est encore aujourd'hui sans doute plus répandu qu'aucune autre méthode de fabrication de charbon de bois. C'est pourquoi il est intéressant de l'étudier attentivement pour déceler ses avantages et ses inconvénients. La charbonnière en terre conserve manifestement sa place en raison de son faible coût. Partout où il pousse des arbres, on trouve de la terre, et il est naturel que l'on se soit adressé à ce matériau incombustible peu coûteux pour enfermer hermétiquement le bois durant la carbonisation.

On peut employer la terre de deux manières distinctes pour confectionner une charbonnière. La première consiste à creuser une fosse dans laquelle on place la charge de bois, et que l'on recouvre hermétiquement avec la terre de déblai. La seconde consiste à recouvrir de terre une pile ou meule de bois sur le sol (5, 12, 16, 19, 20, 21, 28). La terre forme une barrière imperméable à l'abri de laquelle la carbonisation peut se produire sans qu'il y ait infiltration d'air, qui entraînerait une combustion complète du charbon. Les deux méthodes, si elles sont habilement appliquées, permettent de produire un bon charbon de bois, dans les limites de leurs possibilités techniques.

5.1 La méthode

La carbonisation en fosse exige une couche épaisse de sol. On trouve habituellement des dépôts convenables de sol meuble le long des berges des ruisseaux. La fosse peut avoir de grandes dimensions, et le cycle complet de carbonisation peut prendre jusqu'à trois mois (13, 31, 32). La mise de fonds initiale est minime; il ne faut rien de plus qu'une pelle, une hache et une boîte d'allumettes. Mais cette méthode est dispendieuse en ressources ligneuses. Il est très difficile de contrôler la circulation de gaz dans la fosse, et une grande partie du bois est réduite en cendres parce qu'elle reçoit trop d'air, tandis qu'une autre portion n'est que partiellement carbonisée parce qu'elle n'a pas été convenablement chauffée et sechée durant l'opération. Outre ces variations grossières de qualité, il y a des variations dans la teneur en matières volatiles, c'est-à-dire dans le degré de carbonisation du charbon acceptable. La raison en est que dans la fosse la carbonisation commence à un bout et progresse vers l'autre extrémité; le charbon produit au début, étant chauffé plus longtemps, a une teneur en matières volatiles bien plus basse que celui produit à la fin de l'opération. Pour les besoins domestiques, cela n'est pas un problème sérieux, bien qu'entraînant une diminution du rendement global, le charbon surchauffé ou "dur" produit près du point d'allumage, à faible teneur en matières volatiles et forte teneur en carbone pur, ayant un rendement faible (théoriquement environ 30%). Cette surchauffe à une extrémité est inévitable si l'on veut carboniser toute la charge.

Un autre problème avec les charbonnières en fosse est la réabsorption d'acides pyroligneux par le charbon sous l'effet de la pluie. Les acides pyroligneux tendent en effet à se condenser dans le feuillage et la terre utilisés pour couvrir la fosse; s'il tombe une forte pluie, ils sont lessivés et sont réabsorbés par le charbon. Ils font pourrir les sacs de jute, et le charbon en brûlant dégage une fumée désagréable.

Néanmoins, des charbonniers habiles utilisant des fosses qui ne soient pas trop grandes parviennent à faire du charbon de bois d'excellente qualité (31). Le faible investissement nécessaire incite à recourir à ce système là où le bois est abondant et la main-d'oeuvre à bon marché.

Photo 6. Charbonnière en fosse en cours de chargement. Noter l'important diamètre de bois ronds utilisable. Ghana. Photo Lejeune.

5.1.1 Carbonisation en petites fosses

Les petites fosses, de l'ordre d'un mètre cube, sont intéressantes pour produire de petites quantités de charbon à partir de bois de faibles dimensions suffisamment secs. Cette méthode est employée à l'échelle du village, mais sa productivité est trop faible pour pouvoir fournir de grandes quantités de charbon de bois à échelle commerciale. Pour faire du charbon de cette manière, on commence par allumer du feu dans la fosse, et on ajoute du petit bois sec pour avoir un grand feu. On ajoute encore du bois pour remplir la fosse, le feu continuant de brûler régulièrement. On recouvre alors le bois d'une couche de feuillage d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, puis d'une couche de 20 cm de terre. On laisse la carbonisation se faire, et on peut rouvrir la fosse au bout de deux jours ou moins. Il peut être nécessaire d'asperger le charbon avec de l'eau pour éviter qu'il ne s'enflamme lors du déchargement. Le charbon obtenu n'est pas de qualité uniforme, et si l'on utilise des petits bois et de l'écorce la proportion de débris est excessive. On recouvre parfois la fosse avec de vieilles tôles de toiture sur lesquelles on met une couche de terre, en ménageant quelques petites ouvertures pour permettre la sortie de la fumée et l'entrée de l'air.

5.1.2 Carbonisation en grandes fosses

Les fosses normalement utilisées sont de grande taille, et la carbonisation a lieu progressivement d'une extrémité vers l'autre. Les grandes fosses produisant 6 tonnes ou plus de charbon de bois par fournée sont difficiles à contrôler, mais assurent un meilleur rendement de la main-d'oeuvre. Avec des fosses plus petites, on a une meilleure circulation de l'air et on produit un charbon plus uniforme, mais leur rendement est moins bon

La figure 2 montre une grande charbonnière en fosse, d'environ 30 m^3 de volume brut, pouvant contenir une charge d'environ 26 m^3 de bois. On préfère un sol de limon sableux suffisamment profond. Il faut environ trois journées d'ouvrier pour creuser la fosse, plus une journée pour confectionner les conduits pour l'allumage et pour la sortie de la fumée.

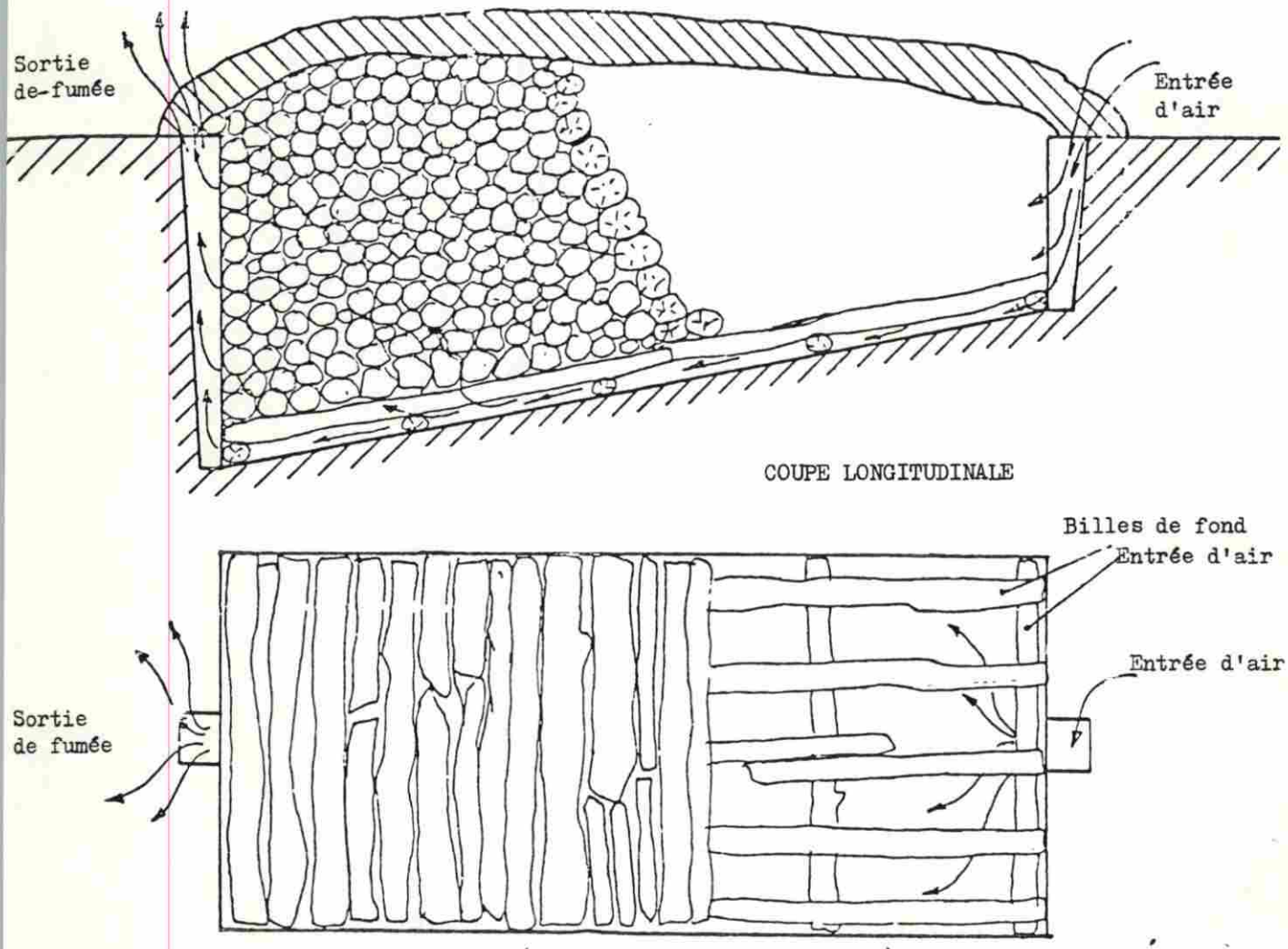


Fig. 2. Charbonnière en fosse de 30 m^3

La fosse est chargée avec des billes mesurant 2,40 m ou moins, qui se rangent facilement en travers. Il faut prendre soin, lors du chargement, de boucher le plus possible les vides entre les billes avec des branches et des petits bois afin d'améliorer le coefficient de remplissage. Par suite de la grande longueur des morceaux que l'on peut utiliser dans cette fosse, le tronçonnage à la hache reste une méthode pratique pour le petit entrepreneur ne disposant pas de capital. Les scies à chaîne sont néanmoins largement utilisées. Pour garantir un chauffage convenable du bois en vue de la carbonisation, on assure le passage des gaz chauds tout le long du fond de la fosse en plaçant la charge sur un soubassement de grumes.

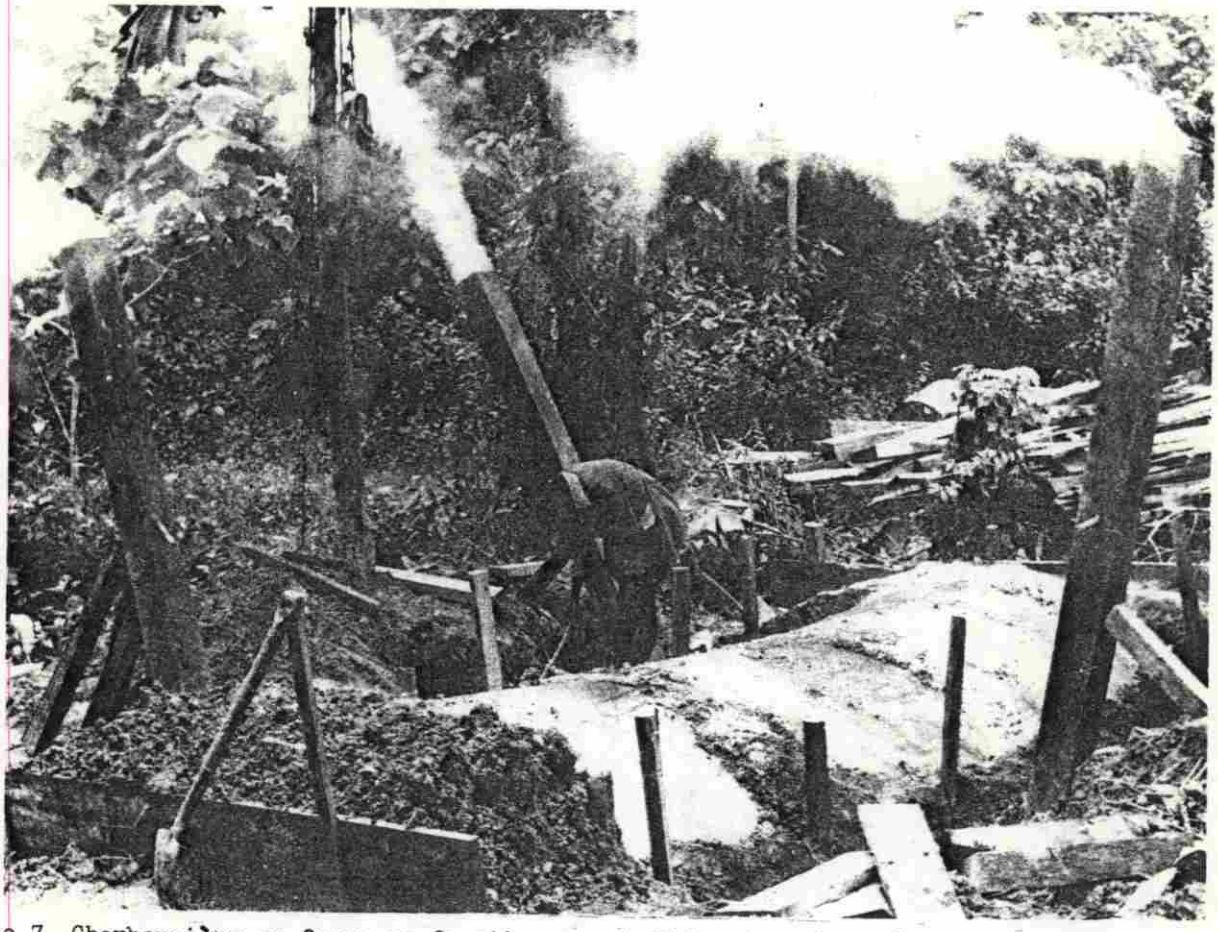


Photo 7. Charbonnière en fosse en fonctionnement. Noter les cheminées en tôle, et la couverture faite de plaques de tôle fléchies entre deux rangées de piquets. Les joints entre les tôles sont colmatés avec de la terre. Ghana.Photo Lejeune.

On place tout d'abord cinq billes, coupées à la largeur de la fosse, régulièrement espacées suivant la longueur, puis on met sur cette première couche, à écartement régulier, quatre autres grumes de la longueur de la fosse. Ce soubassement supporte la charge tout en permettant aux gaz chauds, une fois qu'on a allumé à une extrémité, de passer par-dessous et de chauffer la charge en se dirigeant vers le conduit de fumée situé à l'extrémité opposée. Ces gaz chauds, produits par la combustion d'une partie du bois, sèchent lentement la terre et chauffent le reste du bois jusqu'à la température de carbonisation d'environ 280°C. Il se produit alors une décomposition spontanée du bois avec dégagement de chaleur, qui donne du charbon de bois. Un volume important de vapeur d'eau, d'acide acétique et autres, de méthanol et de goudrons se dégage en même temps, et transmet aussi sa chaleur au bois en cours de séchage en se dirigeant vers le conduit de sortie. Finalement tout le bois est séché, porté à la température de carbonisation, et se transforme en charbon de bois. La phase de carbonisation peut durer de 20 à 30 jours, et elle s'accompagne d'une diminution marquée du volume de la charge de bois, jusqu'à 50-70% de son volume initial. La terre qui recouvre la fosse s'affaisse lentement au cours de la carbonisation, et les fentes ou les ouvertures qui pourraient apparaître doivent être bouchées pour éviter l'infiltration d'air. Il y a un danger de brûlure mortelle pour les personnes et les animaux qui tomberaient ou s'aventureraient sur la fosse, et il faut prendre les précautions nécessaires pour l'éviter.

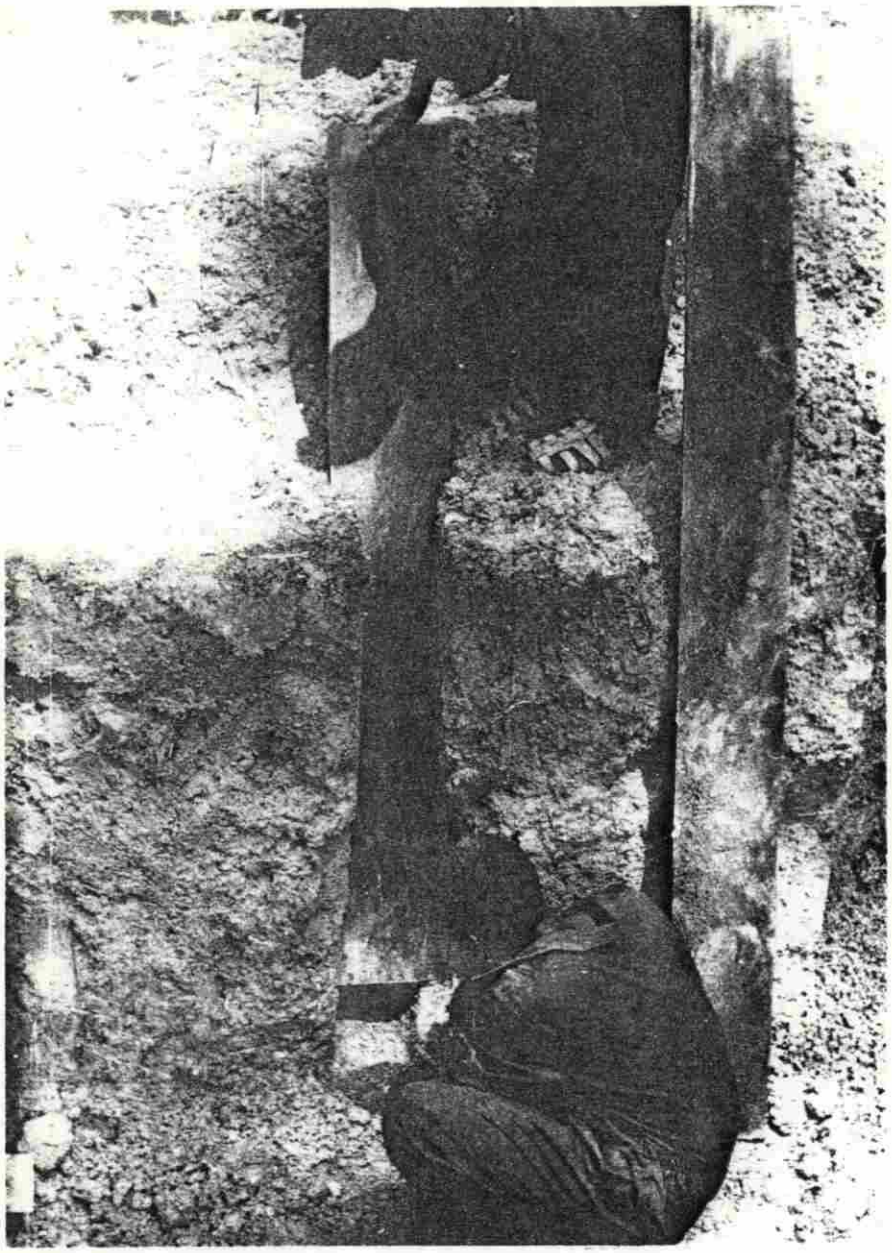


Photo 8. Les évents des charbonnières en fosse peuvent être boisés lorsque le sol est trop meuble, ce qui évite l'emploi de métal. Ghana. Photo Lejeune.

Lorsque la couverture de la fosse s'est affaissée sur toute sa surface, la carbonisation est considérée comme terminée. On obstrue alors toutes les ouvertures, et on laisse la charbonnière se refroidir, ce qui peut prendre une quarantaine de jours environ, selon le temps qu'il fait. Le refroidissement terminé, on ouvre la fosse et on en sort le charbon, en prenant soin de le séparer de la terre et du sable, et du bois incomplètement carbonisé. On utilise à cet effet des fourches et des rateaux.

La nature de la carbonisation en fosse rend difficile l'obtention d'une fournée de qualité uniforme. Près du point d'allumage, le charbon a normalement une faible teneur en substances volatiles, tandis que le dernier charbon formé à l'autre extrémité, près du conduit de fumée, est riche en produits volatils, du fait qu'il n'a été soumis à la température de carbonisation que pendant un temps court. En outre, comme le flux d'air peut ne pas être uniforme, il peut y avoir dans une fournée une proportion considérable de fumerons. Bien que ceux-ci puissent être récupérés et recyclés, ils représentent une perte de rendement dans les opérations.

On utilise également des fosses plus petites que celles de la figure 2, mesurant par exemple 3 m de long sur 1,2 m de large et 1,2 m de profondeur. La longueur des morceaux de bois à carboniser est d'environ 1 mètre et, comme dans les grandes fosses, les espaces entre les grosses billes doivent être obstrués soigneusement avec des petits morceaux afin d'accroître le rendement de la charge et d'éviter un cheminement irrégulier des gaz d'une extrémité à l'autre, donnant lieu à la production de fumerons.

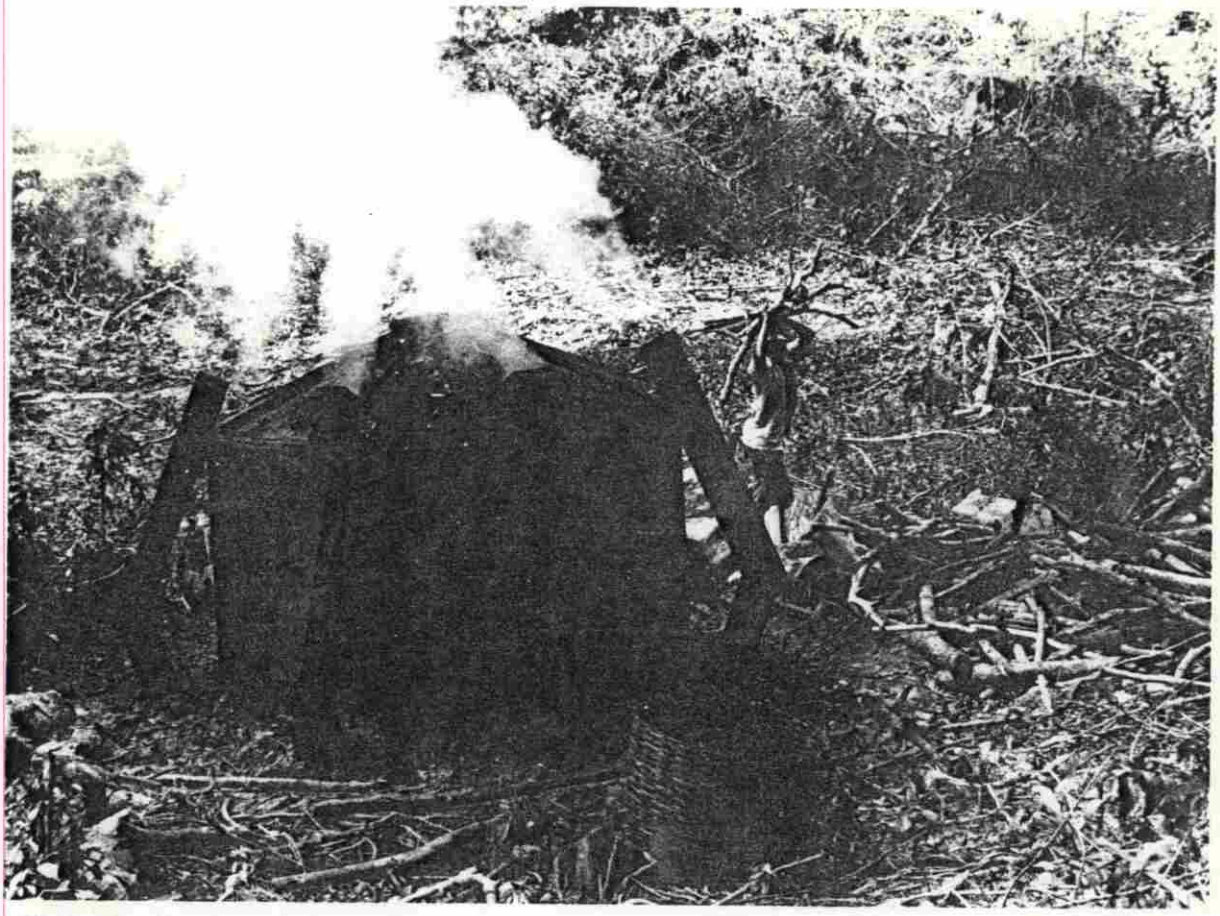


Photo 9. Charbonnière mixte, en fosse et en tôle d'acier. Noter les cheminées enterrées, et le type de bois utilisés. Ghana. Photo Lejeune.

5.2 Données techniques et économiques

Les données suivantes se rapportent à la production de charbon de bois en grandes fosses en Guyane, où ce procédé fonctionne à échelle commerciale depuis de nombreuses années. La production annuelle a varié considérablement, et a atteint un maximum de 6 000 tonnes dans les années cinquante.

Selon les données recueillies sur le terrain et les discussions avec des personnes ayant travaillé selon cette méthode depuis de nombreuses années, on peut présenter les évaluations suivantes pour un homme faisant partie d'une équipe de cinq ouvriers travaillant sur une fosse. Les chiffres sont des nombres de jours de travail par homme et par fosse.

Taille de la fosse:

Longueur 6 m x largeur 2,70 m x profondeur 1,20 m au point d'allumage, 2,40 m à l'extrémité opposée

Volume nominal = 29 m^3

Volume réellement utilisé = 26 m^3

Temps de travail:

- pour creuser la fosse dans du sable meuble ..... 3,0 j
- pour préparer les conduits d'entrée et de sortie de l'air ..... 1,0 j
- abattage et tronçonnage à la hache, transport du bois et empilage (longueur des billes 2,40 m) .....14,0 j
- coupe de broussailles (diamètre 3 cm) et couverture de la fosse ..... 2,0 j
- couverture de sable (30 cm) ..... 1,0 j
- préparation du sable et des pieux autour de la fosse ..... 0,5 j
- déchargement du charbon ..... 1,0 j

22,5 j

Durée de l'opération

- carbonisation ..... 20,0 j
- refroidissement (selon les conditions météorologiques, 30 jours par temps pluvieux, 50 jours par temps sec) moyenne ..... 40,0 j

60,0 j

En pratique, cette fosse est préparée par une équipe de cinq hommes, qui peut faire 1,5 fosse par semaine (7 jours) en travaillant à la hache et à la pelle, ce qui équivaut à 23 journées de travail par fosse. Il faut y ajouter environ 8 jours de travail de surveillance de la carbonisation pendant les 60 jours qu'elle dure. Le nombre de journées de travail par fosse est donc de 31 environ. La production moyenne par fosse est de 6,0 t. Le volume nominal de la charbonnière est de 29 m^3, sa capacité utile de 90%, donc le volume réel utilisé est de 26 m^3. En chargeant avec des bois lourds, de densité 1 000 - 1 100 kg/m^3, on peut y mettre au total 27-28 t. Avec un coefficient de conversion bois/charbon de bois de 4,5 à 1, il est possible d'obtenir 6 tonnes de charbon par fournée avec un cycle de 82 jours. On peut faire trois fournées par an, ce qui donne une production annuelle de 18 tonnes, requérant 31 x 3 = 93 journées de travail par fosse.

Si l'on veut produire mettons 10 000 tonnes de charbon de bois par an, il faudra 10 000 : 6 = 1 666 fournées, chacune demandant 31 journées de travail, soit au total 1 666 x 31 = 51 646 journées par an.

Coût de production de 10 000 tonnes par an

Le coût exact dépend de la manière dont la main-d'oeuvre peut être organisée au cours d'un cycle unitaire de 82 jours. Si 5 hommes travaillent en permanence à creuser, remplir, allumer et décharger les charbonnières, le nombre de fosses qui pourront être faites et déchargées dans l'année s'établira comme suit:

Nombre de jours disponibles dans l'année: 365 - 82 = 283, arrondi à 280, étant donné que les charbonnières démarrées après le jour 280 environ ne seront pas déchargées dans la même année et que leur production ne doit pas être comptée. On admet par conséquent une année de travail de 280 jours, la main-d'oeuvre étant employée toute l'année. Aucune charbonnière ne sera démarrée après le jour 280. 5 hommes peuvent faire, à raison de 1,5 fosses tous les 7 jours en 280 jours, $\frac{280}{7}$ x 1.5 = 60 fosses, produisant chacune 6 t de charbon de bois, soit une production annuelle par équipe de 360 tonnes.

La surveillance des charbonnières demande 8 journées de travail par fosse, donc pour 60 fosses 8 x 60 = 480 journées, soit environ 2 hommes travaillant toute l'année.

On admettra un salaire net, frais généraux exclus, de 10,00 $US par jour.

Préparation et déchargement des fosses 5 hommes x 360 j x 10 $	= 18 000 $
Surveillance de la carbonisation 2 hommes x 360 j x 10 $	= 7 200 $
	25 200 $
Coût par tonne: 25 200 : 360	= 70,00 $US

La production d'environ 10 000 tonnes de charbon par an demandera 28 équipes de 5 terrassiers + 2 surveillants, soit au total 196 hommes, pouvant faire 1 680 charbonnières par an.

Ces calculs supposent une organisation parfaite, et ne tiennent pas compte des frais généraux de main-d'oeuvre ni des bénéfices. Le coût indiqué est celui du charbon empilé à côté de la fosse, prêt pour le transport.

Chapitre 6

CHARBONNIERES EN MEULE

Au lieu de creuser une fosse, on peut empiler le bois en meule sur le sol, et le couvrir de terre. Cette méthode est également très ancienne, et est largement usitée dans de nombreux pays, avec de nombreuses variantes. On a fait des études dans certains pays pour y apporter des perfectionnements; il faut noter à cet égard le travail réalisé il y a quelques années en Suède. Le principe de base de la carbonisation en meules est le même que celui de la charbonnière en fosse, à savoir que le bois à carboniser est enfermé dans un espace clos dont l'étanchéité est assurée par de la terre, matériau disponible partout où l'on trouve du bois. La charbonnière en meule est préférée à la fosse lorsque le sol est rocheux, induré ou superficiel, ou que la nappe phréatique est trop proche de la surface; à l'inverse la charbonnière en fosse est idéale lorsque le sol est bien drainé, profond, limoneux. La meule est également plus pratique dans les zones agricoles où les ressources ligneuses peuvent être disséminées, et où il est souhaitable de faire le charbon de bois près d'un village ou autre installation permanente. Un emplacement de charbonnière en meule peut être réutilisé indéfiniment tandis que les fosses sont plutôt utilisées pour un petit nombre de fournées, et on en recreuse d'autres plus loin pour suivre la progression des coupes. Par ailleurs, si la nappe est proche de la surface du sol ou que celui-ci est mal drainé, la charbonnière en fosse est peu pratique. Le creusement répété des fosses est aussi une gêne pour l'agriculture ou le pâturage. Enfin le bois à carboniser en meule peut être récolté petit à petit au fil des mois, empilé en place, et laissé à sécher complètement avant d'être couvert et carbonisé. Cela s'accorde bien avec le mode de vie du petit paysan qui peut ainsi ramasser des déchets de bois, des branches, des grumes, et les empiler soigneusement en meule. Après quelques mois, en fonction de la saison, du prix du charbon de bois, etc., il couvre la meule de terre et fait son charbon. Il se procure ainsi un petit revenu en argent qui ne nécessite aucun débours initial.

6.1 Types de meules

La charbonnière en meule constitue un système très adaptable. Elle convient aussi bien à la fabrication occasionnelle de charbon de bois à petite échelle qu'à une production à grande échelle. La sidérurgie à base de charbon de bois en Suède, aujourd'hui disparue, produisait en 1940 plus de 80 pour cent de son charbon de cette façon. La charbonnière en meule a été améliorée en Suède grâce à la recherche, les progrès les plus importants étant le perfectionnement du système d'évacuation de la fumée, et l'emploi d'une cheminée extérieure pour améliorer la circulation des gaz (2).

Un système hybride, comportant des éléments de la meule et de la fosse, est en usage dans certaines régions d'Afrique. Une pile rectangulaire de rondins tronçonnés à longueur régulière est montée sur un lit de grumes disposées à angle droit pour permettre la circulation des gaz. Le volume de cette pile est habituellement de 5 à 8 mètres cubes. Lorsqu'elle est terminée, on l'enferme avec des murs en terre confectionnés en tassant de la terre entre la pile couverte de feuillage et un coffrage fait de gaules ou de planches retenues par des pieux. Le sommet de la pile est couvert de feuillage et de terre comme pour la charbonnière en fosse. Une ouverture est ménagée dans le mur latéral pour l'allumage, et une fois que le feu a bien pris on l'obture de la même façon avec de la terre et des planches. Des évents sont percés à la base de la pile, et servent à régler la combustion.

On a tenté d'utiliser ce système à plus grande échelle, sous une forme modifiée, en employant des engins de terrassement. Les grosses grumes sont roulées dans une excavation peu profonde, et le reste est poussé et empilé par-dessus à l'aide d'un bulldozer. On étale ensuite des feuillages sur le dessus, et on recouvre le tout avec de la terre poussée au bulldozer. On allume le bois en un ou plusieurs points, et lorsqu'il brûle bien on obture les entrées d'air avec de la terre. Ce système est efficace lorsqu'il ne se produit pas d'entrées d'air dans la couverture de terre. En pratique, on a souvent un rendement médiocre en charbon de bois , parce qu'il est difficile en roulant les grumes d'obtenir

une pile bien rangée, et que la circulation des gaz se fait de manière anarchique, d'où une forte proportion de bois incomplètement carbonisé. L'étanchéité est difficile à obtenir, et il est parfois dangereux pour l'opérateur de chercher à la rétablir. Il en résulte des entrées d'air incontrôlées, et le charbon est réduit en cendres en certains points de la pile avant que le reste ait été convenablement carbonisé. Un autre problème est que, à moins que le travail aux engins de terrassement lourds ne soit bien organisé, avec un bon entretien et des pièces de rechange en quantité suffisante, les coûts tendent à échapper à tout contrôle et à compromettre la rentabilité de toute l'opération. En règle générale, il est difficile de combiner un équipement coûteux avec un système de carbonisation techniquement primitif et d'espérer une bonne rentabilité de l'ensemble, à moins que les opérations ne soient dirigées de manière parfaite.

La difficulté que l'on éprouve à obtenir et maintenir pendant toute la durée de la carbonisation une étanchéité effective et une bonne circulation de l'air est le principal facteur limitant la taille des charbonnières en fosse et en meule. Il est malaisé de détecter les fuites dans la couverture, et dans les très grandes charbonnières difficile de les réparer.

Photo 10. Charbonnière en meule en cours d'empilage, montrant le point d'allumage. Ghana. Photo Lejeune.

6.2 Confection d'une meule type

La meule de carbonisation villageoise type a environ 4 mètres de diamètre à la base sur 1 m - 1,50 m de hauteur, et a plus ou moins la forme d'un hémisphère aplati. De six à dix entrées d'air sont ménagées à la base, et un trou d'environ 20 cm de diamètre ouvert au sommet permet à la fumée de s'échapper lors de la carbonisation. Toutes les ouvertures doivent être obturées avec de la terre lorsque la carbonisation est achevée, et on laisse alors la meule se refroidir.

Pour monter la meule, on défriche un espace d'environ 6 mètres de diamètre, et on en nivelle et tasse le sol, qui doit être bien drainé. Un pieu d'environ 2 mètres de haut est parfois dressé au centre de la future meule pour aider à l'empilage du bois, donner de la stabilité à la meule, et fournir un point d'appui à l'opérateur au moment de couvrir la meule de terre et de faire le trou de fumée au sommet, et ensuite lors de l'allumage. Ce pieu est généralement enlevé avant l'allumage, de façon à former une cheminée centrale dans la meule.

Une claie formée de rondins entrecroisés d'une dizaine de centimètres de diamètre est tout d'abord disposée sur le sol pour former un cercle d'environ 4 mètres de diamètre. Le bois à carboniser est ensuite empilé serré sur cette plateforme, dont le rôle est de permettre une bonne propogation du feu et une bonne circulation des gaz. Les morceaux de bois les plus longs (jusqu'à 2 mètres) sont empilés verticalement, appuyés contre le poteau central, et les morceaux plus petits sont dressés à la périphérie de façon à obtenir un profil plus ou moins régulier. Les vides entre les billes sont remplis avec des petits bois, pour avoir une pile aussi dense que possible. La surface de la pile est couverte d'une couche de petit bois, pour avoir un profil aussi uni que possible et fournir un bon support à la couverture de terre. Il est bon de laisser le bois empilé sécher pendant aussi longtemps que possible, et de couvrir la meule par temps sec. Pour cela on étale d'abord sur la meule une couche de paille, de feuillage, d'herbes grossières, etc., que l'on recouvre ensuite de terre ou de sable. Un sol sableux ou limoneux, ayant un faible retrait au séchage, est préférable; les argiles très plastiques, ayant une tendance marquée à se rétracter et fendre au séchage et à la chaleur, doivent être évitées. Du poussier de charbon peut être mélangé à la terre. L'épaisseur de la couverture variera en fonction de l'égalité de la surface de la meule, mais elle est habituellement de 10 à 20 cm. Il faut l'inspecter pour reboucher toutes les fentes, et vérifier que les évents à la base de la meule restent bien ouverts.

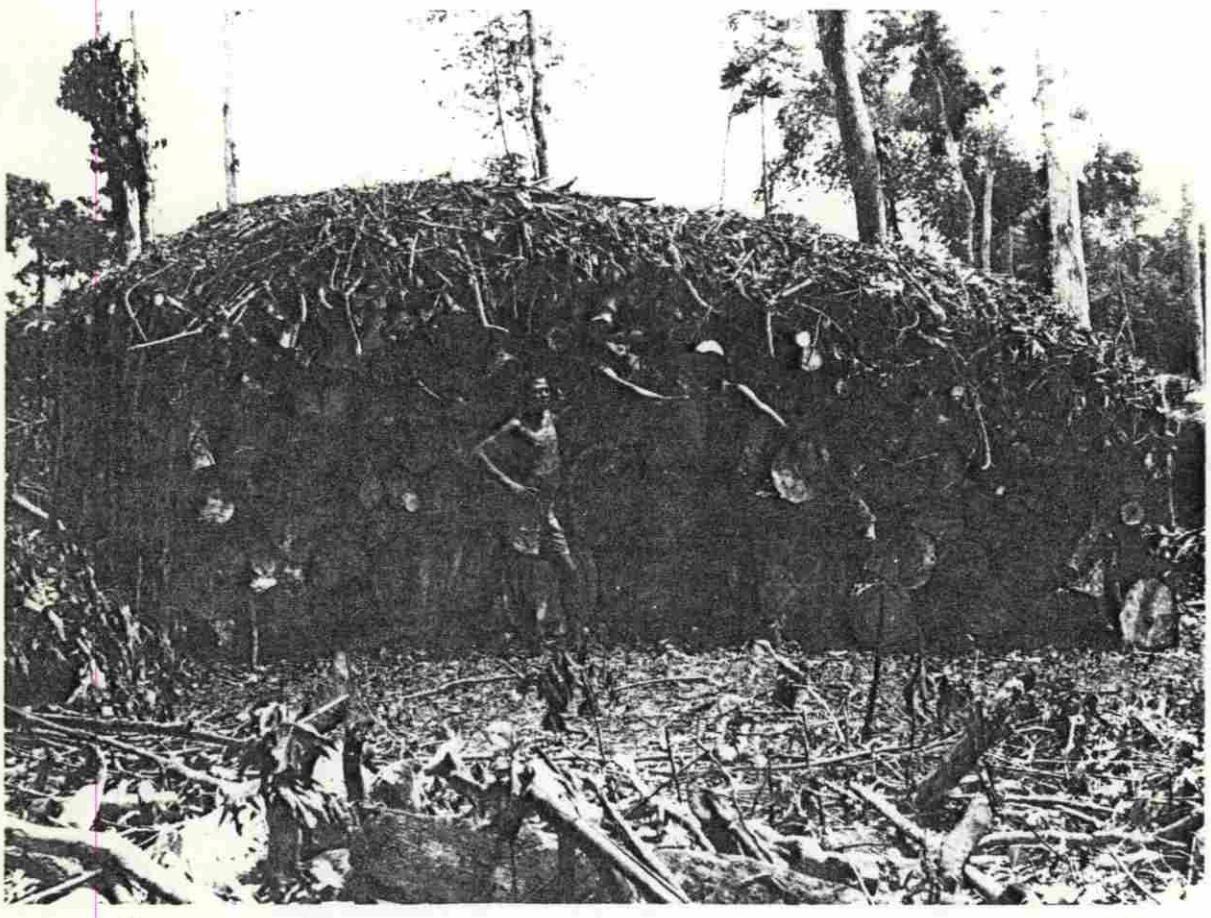


Photo 11. Charbonnière en meule en construction. Noter les bois de gros diamètre placés à la base de la meule. Ghana. Photo Lejeune.

Si nécessaire, on laisse sécher la couverture de terre pendant une journée, et on peut alors procéder à l'allumage. Une pelletée de bois et de charbon enflammés est placée dans le trou au sommet de la meule, ce qui met le feu au bois d'allumage qui recouvre la pile. Une fumée blanche épaisse sort du sommet, indiquant que le feu a pris. Après quelques jours la fumée prend une teinte bleutée, et finalement devient presque limpide. Le temps nécessaire pour accomplir la carbonisation dépend de la teneur en humidité du bois et de la régularité de la circulation des gaz à l'intérieur de la meule. L'opérateur doit tâter la paroi pour déceler les points chauds ou froids, et fermer ou ouvrir les évents situés au-dessous. A aucun moment on ne doit voir à travers les évents une chaleur rougeoyante; si cela se produisait, il faudrait les boucher. Les fentes qui peuvent se former dans la couverture doivent être obturées avec de la terre meuble sableuse. Lorsque la carbonisation est jugée complète, l'ouverture au sommet et tous les évents à la base de la meule doivent être soigneusement bouchés avec des briques ou des pierrres colmatées avec de l'argile. La meule se refroidira en deux ou trois jours, si elle est de petite taille.

Lorsque la meule est refroidie, on peut l'ouvrir. Il faut avoir une centaine de litres d'eau sous la main pour éteindre le feu qui pourrait s'allumer. Etant donné qu'on ne recherche normalement pas un rendement intensif avec les charbonnières en meule, on peut généralement les laisser refroidir pendant suffisamment de temps avant de les ouvrir.

Les morceaux de charbon bien carbonisés sont séparés du poussier et des fumerons, et mis dans des sacs ou des paniers pour être vendus. La terre brûlée provenant de la meule peut être mise de côté et réutilisée une fois qu'elle aura été désagrégée par la pluie.

Les rendements en charbon varient selon l'habileté de l'opérateur, la siccité du bois, et l'étanchéité à l'air de la meule. Un rendement de 1 tonne de charbon pour 4 tonnes de bois sec à l'air représente un bon résultat. Des rendements de 1 tonne pour 6 tonnes de bois sont plus courants.

Ce type de meule a été modifié par addition d'une cheminée faite de vieux fûts métalliques soudés ensemble. Des essais effectués au Sénégal avec ce système modifié ont montré de bons résultats. La cheminée améliore la circulation des gaz, ce qui réduit la proportion de fumérons et accélère la carbonisation. Du fait qu'il y a moins de fumerons, le rendement en charbon est amélioré.

Cette charbonnière modifiée, dite "charbonnière Casamance", est illustrée fig. 3, et décrite dans la section di-dessous.

6.3 La charbonnière type Casamance

La base de la meule est faite de deux couches de bois de petite et moyenne dimension (16). Pour la première couche, les bois sont disposés régulièrement, radialement autour du centre de la base, et pour la deuxième couche ils sont rangés tangentiellement, perpendiculaires à ceux de la première couche. Cette base joue un rôle important, car elle assure l'écoulement de l'air dans la meule.

Les couches composées de grosses billes (40 cm de diamètre) sont disposées à partir du centre jusqu'à 50 cm de la périphérie de la base. Elles sont entourées par des billes de moyen diamètre (20-40 cm), qui donnent de la solidité à la meule, et qui couvrent presque entièrement le reste de la base.

Le dernier anneau est composé essentiellement de bois courts, de 20 à 40 cm de diamètre, disposés sur le pourtour de la base. Le diamètre de celle-ci varie en fonction du volume de la meule:

Pour une meule de 30 m^3 il faut une base d'au moins 3 m de rayon
" " " " 60 m^3 " " " " " " 4 m " "
" " " " 100 m^3 " " " " " " 5 m " "

La meule est couverte avec de l'herbe et des broussailles, puis du sable ou de la terre limoneuse. La cheminée est placée sur le pourtour, comme le montre le schéma, l'ouverture à la partie inférieure étant en communication avec la base de la meule.

L'emplacement de la meule doit être nettoyé au rateau, et débarrassé des racines et des souches.

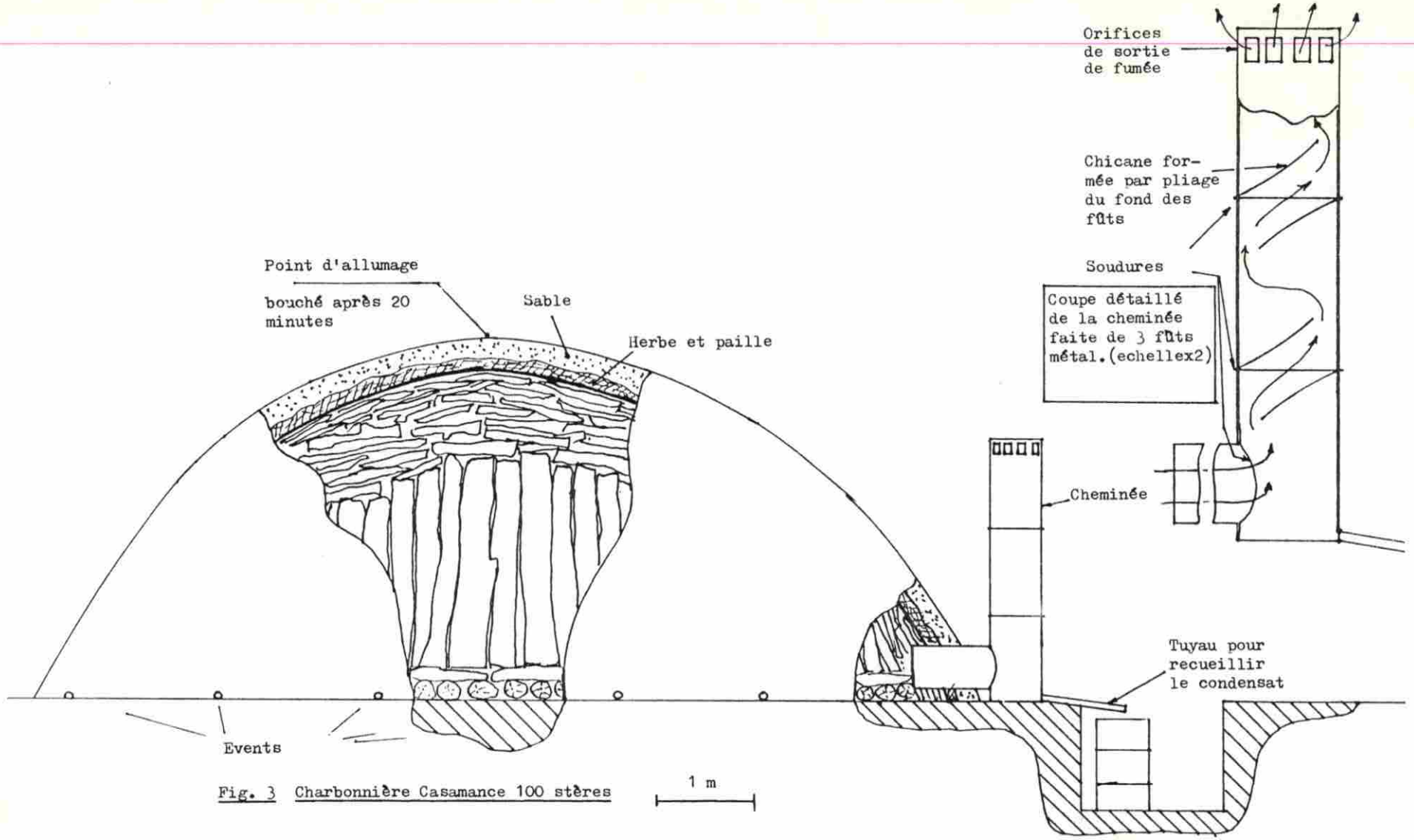


Fig. 3 Charbonnière Casamance 100 stères

Règles pour la carbonisation

Une fois que le feu est allumé il faut une surveillance constante (3) jusqu'à ce que la carbonisation soit achevée. La meule est mise à feu en jetant des braises ardentes par le trou central. Une fois que leu feu a pris (après 15 à 20 minutes), ce trou doit être obturé, et des évents ouverts tous les 3 ou 4 mètres sur le pourtour de la base. Il ne faut jamais faire d'ouverture près de la cheminée, car cela ne ferait que diminuer le tirage dans le reste de la meule. S'il ne sort pas de fumée par la cheminée, il faudra y allumer un petit feu pour amorcer le tirage.

Au fur et à mesure que la carbonisation progresse, la meule s'affaisse peu à peu, et il peut apparaître des crevasses, qui devront être immédiatement obturées avec de l'herbe et du sable. La cheminée sera enlevée si le côté sur lequel elle se trouve semble être complètement carbonisé.

Les différentes phases de la carbonisation sont les suivantes:

- Chauffage, de la température ambiante à 100°C;
- Déshydratation, entre 100° et 120°C;
- Réaction exothermique commençant à 270°C, pour atteindre 500° à 700°C lorsque la carbonisation est complète;
- Refroidissement, au cours duquel la cheminée est enlevée et la meule maintenue hermétiquement couverte.

Après s'être refroidie, la meule est ouverte à l'aide de rateaux, en commençant par la base. L'ouverture doit être refermée après qu'une partie du charbon a été enlevée, et cette manière de procéder sera poursuivie jusqu'à ce que l'opération soit achevée.

Le charbon qui vient d'être sorti de la meule doit être couvert de sable pour prévenir son inflammation. Cela évite une perte de qualité lorsqu'on l'éteint avec de l'eau. Seul le charbon en morceaux doit être ensaché, les fumerons et le poussier étant écartés. Les sacs seront fermés avec une ficelle, à laquelle on attachera une étiquette de contrôle indiquant le poids du sac et le numéro de la charbonnière.

Les fumerons seront carbonisés dans une nouvelle charbonnière. La carbonisation est terminée lorsque la fumée commence à diminuer et devient bleue. A partir de ce moment c'est le charbon lui-même qui brûle, d'où la nécessité d'enlever la cheminée et de fermer hermétiquement la meule. Au cours de la phase de décomposition exothermique les sous-produits se condensent à la base de la cheminée, où ils sont recueillis; ce condensat est un mélange de goudron de bois et d'acide pyroligneux (voir section 4). La meule Casamance est basée sur le principe du tirage inversé, c'est-à-dire que l'air entre par les évents de la base et que les gaz chauds, au lieu de s'échapper par le sommet, redescendent et passent par la cheminée, qui est reliée à la base de la meule.

Au cours de la phase de refroidissement, les charbonniers commenceront à bâtir la meule suivante, en commençant par l'assemblage de la base.

6.4 Récupération des goudrons avec la charbonnière Casamance

La récupération du condensat à la base de la cheminée dans la charbonnière type Casamance pose certains problèmes qu'il convient de ne pas perdre de vue. Le volume théorique qui peut se condenser est considérable, et se compose principalement d'eau sans valeur. A partir de 100 stères de bois - soit une meule Casamance de grande taille - on peut obtenir environ 21 tonnes de condensat, qui demanderaient une centaine de fûts de 200 litres pour les contenir. Ce condensat est formé essentiellement d'eau, qui est corrosive et contamine l'environnement en raison de sa teneur en acide acétique et autres acides voisins. On peut recueillir en outre environ 2 tonnes de goudron, remplissant une dizaine de fûts, en supposant qu'il n'en soit pas brûlé une partie avant d'arriver à la cheminée. En pratique il est indispensable de permettre à toute l'eau et aux substances acides de s'échapper normalement par la cheminée sous forme de vapeur; leur dilution dans l'atmosphère diminue leurs effets polluants et irritants. On y parvient en maintenant la cheminée chaude, et en évitant les vents froids. On perd ainsi une partie du goudron, mais c'est inévitable avec un tel sytème simple, sinon le puisard de récupération déborderait, et la zone serait sérieusement contaminée par le condensat. Lorsqu'on opère par temps froid, entraînant une condensation d'eau excessive, il faut isoler la partie inférieure de la cheminée, ou construire une cheminée en briques. En maintenant la cheminée chaude, c'est-à-dire aux environs de 100°C, on assure un tirage continu qui permet une circulation convenable des gaz dans la charbonnière, avec une bonne carbonisation, et on aura encore une condensation de goudron. Pour plus d'information sur la récupération et le traitement du condensat provenant de la carbonisation du bois, voir chapitre 12.

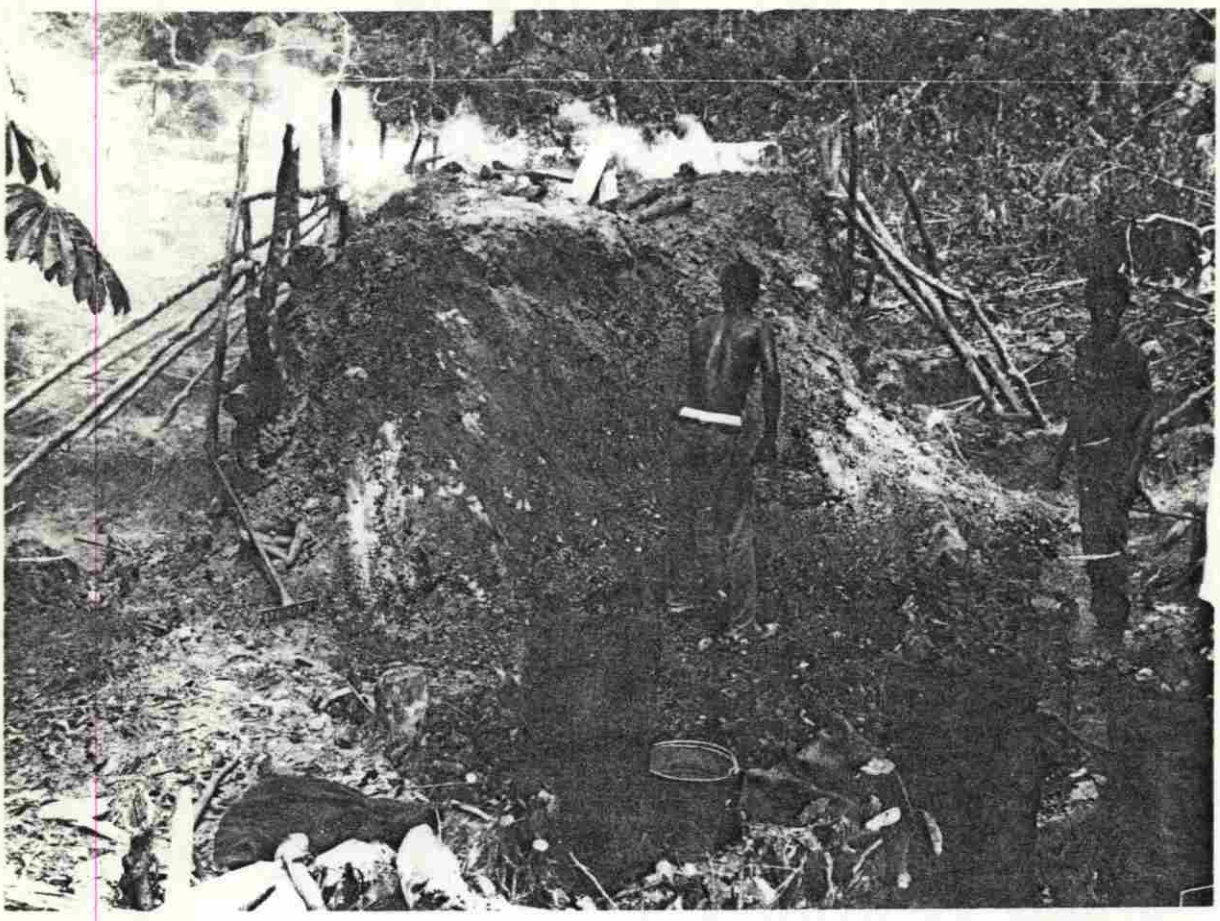


Photo 12. Déchargement et ensachage du charbon de bois fait en meule. Noter le rateau utilisé pour séparer le charbon marchand de la terre de couverture lors de l'ouverture de la meule. Ghana. Photo Lejeune.

6.5 Prix de revient du charbon de bois produit avec la charbonnière Casamance (d'après l'expérience sénégalaise)

Les données ci-dessous se rapportent à une meule de 100 m^3:
Les prix sont en francs CFA (en 1978 1 $US = 310 F CFA).
1 stère de bois donne 120 kg de charbon.
Main-d'oeuvre : 3 charbonniers par meule.

Coûts de production pour 12 000 kg de charbon de bois

		% du total
100 stères de bois à 550 FCFA/st	55 000	28,0
Main-d'oeuvre, y compris ensachage	77 040	39,2
Chargement des camions à la charbonnière à 250 F CFA/tonne	3 000	1,5
Transport au dépôt principal	10 449	5,3
Déchargement au dépôt principal	2 200	1,1
Sacs	15 000	7,6
Taxe à 1,50 F CFA/kg	18 000	9,2
	180 689	91,9
plus divers et imprévus 10% du coût hors taxe	16 000	8,1
Coût du charbon de bois rendu au dépôt	196 689	100%

= 16,40 F CFA/kg

Transport vers les principaux marchés :

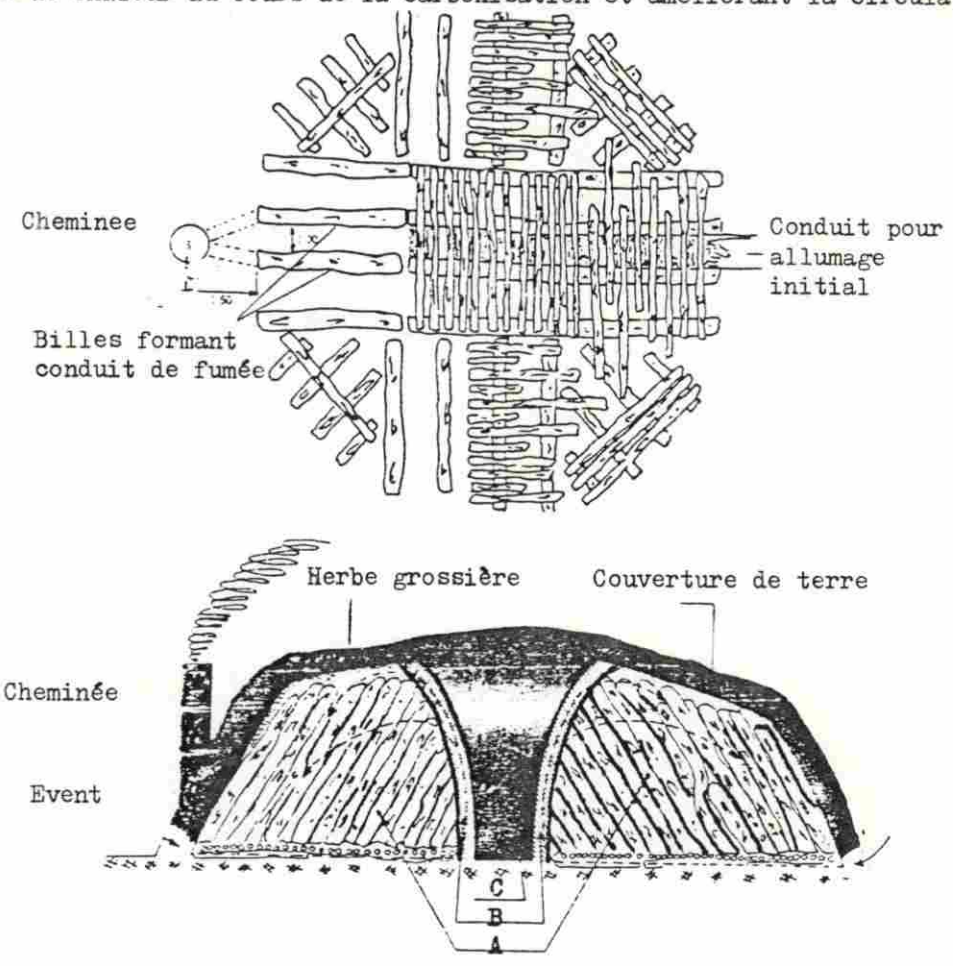
a) à Ziguinchor (1,81 F CFA/kg)	18,21	F CFA/kg
b) à Dakar (8,00 F CFA/kg)	24,40	F CFA/kg

Bénéfice ou perte en vendant à:

a) Ziguinchor :	prix du marché 20 F CFA/kg	Bénéfice = + 1,79	F CFA/kg
b) Dakar:	prix du marché 22,50F CFA/kg	Perte = - 1,90	F CFA/kg

6.6 La charbonnière suédoise en meule avec cheminée

La sidérurgie au charbon de bois de Suède (2, 23) a porté la conception et l'utilisation des charbonnières en meule de grande taille à un degré élevé de perfection. Les principales améliorations ont été l'emploi d'une cheminée extérieure reliée à un conduit de fumée ménagé sous la meule, et l'adoption pour celle-ci d'un plan circulaire réduisant les pertes de chaleur au cours de la carbonisation et améliorant la circulation des gaz.



A. Bois
B. Zone de carbonisation
C. Charbon

Fig. 4 Charbonnière suédoise

Ces charbonnières produisaient autrefois de grandes quantités de charbon de bois pour l'industrie sidérurgique, mais elles ont été supplantées par les fours en briques tels qu'en usage au Brésil, en Argentine et dans le Sud-Est asiatique.

La charbonnière est construite de la manière suivante:

Le fond est garni de billes formant un soubassement à claire-voie, sur lequel le bois sera empilé verticalement. Il forme entre le sol et la charge de bois un espace libre dans lequel passe l'air nécessaire pour la carbonisation. Le bois empilé est couvert de feuillage et d'herbe, puis de terre sur une vingtaine de centimètres d'épaisseur.

Une cheminée extérieure, faite avec de vieux fûts métalliques, est reliée à la meule par un conduit creusé dans le sol, qui passe sous la pile de bois et est couvert avec des bois ronds. Un certain nombre d'évents sont ouverts sur le pourtour de la base circulaire.

La carbonisation est mise en route en introduisant une torche enflammée dans le conduit d'allumage situé à l'opposé de la cheminée. Ce type de meule est réputé facile à employer, produisant un charbon de bois de bonne qualité avec un rendement en volume charbon/bois de 55%. Le volume de la meule varie entre 100 et 250 m^3 de bois. Le cycle entier dure 24 jours : 4 jours pour le chargement, 6 jours pour la carbonisation, 10 jours pour le refroidissement, et 4 jours pour le déchargement. En raison de la température de carbonisation élevée (environ 550°C), et de la lenteur du processus, le charbon produit dans les meules suédoises a une proportion élevée de carbone pur et faible de matières volatiles, et il a par suite une faible densité apparente, 130 à 160 kg/m^3 pour le charbon fait à partir de bois de conifères. En raison de sa basse teneur en matières volatiles il n'a qu'une très faible tendance à s'enflammer spontanément. Cependant, l'emploi de charbonnières en terre pour la production à grande échelle de charbon de bois métallurgique n'est plus considéré comme praticable, pour les raisons suivantes. La charbonnière doit être entièrement reconstruite après chaque cycle. Le cycle de production de 24 jours est trop long. La conduite de la charbonnière, bien que simple dans son principe, exige beaucoup de savoir-faire et d'expérience, et même un certain art. Partout où l'on recherche la simplicité de construction et de fonctionnement, la souplesse et la mobilité, les fours simples en briques donnent de bons rendements tout en étant rapides et simples à utiliser.

Chapitre 8

FOURS METALLIQUES

L'emploi de fours de carbonisation métalliques transportables de forme cylindrique s'est répandu en Europe à partir des années trente. Durant la deuxième guerre mondiale la technique en a été perfectionnée par le Laboratoire de recherches sur les produits forestiers de Grande-Bretagne et diverses versions du modèle original ont été utilisées dans ce pays. Cette technique s'est transmise vers la fin des années soixante aux pays en développement, notamment grâce à l'action entreprise par le Service forestier ougandais. Pour plus d'information, voir aussi les références 7, 8, 9, 10, 17, 18, 25, 34.

8.1 Modèles existants de fours métalliques transportables

L'Institut des produits tropicaux (Tropical Products Institute), unité scientifique de l'Administration britannique du développement outre-mer, a acquis une grande expérience en matière d'utilisation de fours métalliques transportables tant en Grande-Bretagne que dans de nombreux pays en développement. Il a mis au point un modèle de four qui est considéré comme optimal du point de vue de l'économie de construction, de la robustesse et de la durabilité, de la facilité d'emploi et du rendement dans les conditions que l'on rencontre dans les pays en développement.

Les principales caractéristiques du four TPI sont les suivantes:

- Fabrication en tôle d'acier de 3 mm pour la section inférieure, 2 mm pour la section supérieure et le couvercle.
- Les deux sections principales du four sont cylindriques.
- Deux rebords en fer cornière de 50 mm, servant à supporter la section supérieure et le couvercle, sont soudés au sommet intérieur des deux sections cylindriques.
- Les huit conduits d'entrée d'air et de sortie des gaz sur lesquels repose la section inférieure du four ont une base ouverte. Un collet soudé sur le trou percé à la face supérieure de chaque conduit permet d'y emboîter une cheminée lorsque le four fonctionne.
- Quatre orifices symétriques sont percés dans le couvercle du four pour laisser échapper la vapeur.

Ces caractéristiques peuvent varier dans les différentes versions de fours métalliques transportables existantes. Certains fabricants emploient des tôles plus minces que celles recommandées dans le modèle TPI. Pour assurer une durée de vie maxima, surtout si le four est manié sans ménagement, l'épaisseur et la qualité de tôle utilisées dans la construction sont d'importance primordiale. La section inférieure est soumise à la chaleur la plus intense, et doit être faite en tôle d'acier de 3 mm, tandis que pour la section supérieure et le couvercle une épaisseur de 2 mm est suffisante. L'emploi d'acier Corten A au lieu d'acier doux accroîtra encore la durabilité du four. Cet alliage spécial a des propriétés de résistance à la chaleur et à l'oxydation. Son prix de base est d'environ 10% supérieur à celui de l'acier doux, mais la différence peut être plus grande s'il faut des arrangements spéciaux pour se le procurer.

Un modèle de four très utilisé dans les forêts de Grande-Bretagne a une section supérieure tronconique, de sorte que le couvercle a un diamètre nettement inférieur à celui de la section inférieure, ce qui réduit son poids, rend l'assemblage du four plus aisé et accroît la rigidité de l'ensemble de la section supérieure sans modifier les performances du four. Cette caractéristique n'est toutefois pas utilisée dans le modèle TPI, parce qu'une section tronconique serait plus difficile à réaliser dans les petits ateliers de construction métallique que l'on trouve dans les pays en développement, et serait plus malaisée à déplacer en forêt en la roulant sur le sol.

Les joints entre les sections ont une importance capitale. Sur un modèle de four métallique, on emploie des rainures au lieu de rebords plats pour supporter la section supérieure et le couvercle. Ces rainures sont soudées à l'intérieur du bord supérieur des deux sections; lors de l'assemblage du four on les remplit de sable pour former un joint étanche lorsqu'on y emboîte la section supérieure et le couvercle. Toutefois, ces rainures

recueillent le goudron de bois qui se condense sur les parois du four, et les températures élevées atteintes lors des dernières phases de la carbonisation cuisent le mélange de goudron et de sable en une masse compacte qui demande des heures d'efforts pour en nettoyer les rainures après chaque opération. En outre, les sections se soudent souvent ensemble après le refroidissement, et les joints risquent d'être endommagés lorsqu'on emploie des leviers métalliques pour les séparer. Un autre défaut de conception sérieux consiste à avoir entre la section supérieure et le couvercle un joint à recouvrement, dont l'étanchéité est assurée par une jupe verticale soudée à la partie inférieure du couvercle. Si l'on constate une fuite dans le joint une fois le four allumé, il est extrêmement difficile d'y remédier, prace que le recouvrement du couvercle ne permet pas de colmater le joint avec de la terre ou du sable. Ces difficultés ne se présentent pas avec le modèle TPI, parce que les fers cornière qui supportent la section supérieure et le couvercle ne ramassent pas le goudron, et par ailleurs la position du couvercle à l'intérieur du bord supérieur de la section supérieure permet d'ajouter du sable ou de la terre sur le joint pour l'étancher lorsque c'est nécessaire.

Sur certains fours on utilise comme conduits des tuyaux de section carrée. En pratique, les conduits ouverts par le bas du modèle TPI se sont avérés plus commodes d'emploi. La raison en est que le goudron qui se condense dans les cheminées lors de la carbonisation s'écoule dans les conduits, où la chaleur le transforme en poix compacte. Avec des conduits à base ouverte, la plus grande partie du goudron est absorbée par le sol, et le reste peut être facilement enlevé en raison du libre accès à l'intérieur du conduit. Par ailleurs, après un usage prolongé, l'extrémité des conduits qui rentre dans le four se déforme sous l'effet de la chaleur localisée intense engendrée dans cette zone par l'air entrant en contact avec la charge. Lorsqu'on utilise un conduit de section carrée, les faces supérieure et inférieure se déforment vers l'intérieur, ce qui rétrécit sérieusement le passage de l'air et des gaz brûlés. Il est malaisé de redonner au conduit sa forme initiale, parce que ses surfaces intérieures sont inaccessibles. Avec un conduit ouvert, au contraire, on peut facilement le reformer en le retournant et en le redressant à l'aide d'un marteau.

Sur certains modèles les cheminées sont reliées au conduit par emboîtement dans un trou percé sur la face supérieure de celui-ci. La base de la cheminée est découpée sur une petite section pour permettre le passage de la fumée venant du conduit. Cette méthode risque de restreindre la sortie des gaz si la cheminée est accidentellement tournée,et les conduits ne peuvent être nettoyés facilement durant le fonctionnement du four.

Tous les fours métalliques transportables comportent des dispositifs de renfort pour les protéger lors des manipulations. Un renforcement excessif peut toutefois créer des problèmes, car un four aussi robuste soit-il risque toujours d'être endommagé s'il est déchargé sans soin d'un camion. Un four fortement renforcé demandera alors un effort considérable pour lui rendre sa forme primitive. On peut parfois y arriver en utilisant un cric entre deux morceaux de bois disposés suivant le diamètre de la section endommagée. Le renforcement le plus important à recommander consiste en un cercle de fer cornière soudé sur tout le pourtour du bord inférieur de la section de base, ce qui donne une double épaisseur de métal là où la chaleur est la plus intense, et forme une surface plane qui répartit mieux le poids du four sur les conduits d'admission d'air et de sortie des gaz. Les fers cornière de support soudés intérieurement au bord supérieur des deux sections du four contribuent au renforcement, que complète un fer plat soudé intérieurement au bord inférieur de la section supérieure et du couvercle.

Tous les fours ne comportent pas des trous de sortie de vapeur dans le couvercle. Or, après l'allumage du four, l'abondante vapeur d'eau qui se dégage lors de la première phase de l'opération doit pouvoir s'échapper. S'il n'y a pas de trous de sortie de vapeur, le couvercle doit être calé en position ouverte avant l'allumage, et mis en place une fois que la charge de bois est bien enflammée. On peut aussi surcharger le four, et le temps que la charge met à s'affaisser permet à la vapeur de s'échapper avant que le couvercle se pose sur son rebord d'appui. Les risques évidents que comportent ces deux méthodes provoquent quelque inquiétude chez les apprentis charbonniers lors des stages de formation. Les orifices de sortie de vapeur s'avèrent préférables lorsqu'il s'agit d'introduire les fours métalliques dans une nouvelle région du tiers monde. Ils présentent un autre avantage lorsqu'on carbonise des matières premières de faible dimension telles que broussailles ou coques de noix de coco. Pour maintenir un flux de gaz suffisant à travers la charge au cours de la carbonisation, il est recommandé dans ce cas d'allumer le four au sommet par les trous de sortie de vapeur du couvercle.

Enfin, certains des fours disponibles dans le commerce sont équipés de volets avec charnière et de bouchons métalliques qui servent à couper l'entrée d'air par les conduits lorsqu'on ferme le four. Ces accessoires, qui augmentent le prix de revient du four, s'avèrent à l'usage totalement inutiles. Les volets deviennent inutilisables au bout de quelques jours à cause de la rouille. L'étanchéité du four peut être réalisée plus efficacement en utilisant de la terre ou du sable. Sur certains modèles de fours des poignées sont fixées sur la surface extérieure des sections cylindriques. Des poignées sont nécessaires sur le couvercle, mais sur les sections cylindriques elles sont gênantes lorsqu'on veut les déplacer en les roulant. Il s'avère que le four peut être aisément manipulé sans leur aide.

8.2 Fours de carbonisation faits à partir de vieux fûts métalliques

On peut confectionner des fours de carbonisation à partir de vieux fûts à gazole courants de 200 litres. Cette méthode a été employée avec succès pour carboniser des matières premières brûlant rapidement, telles que troncs de cocotier, coques de noix de coco et broussailles, mais avec des bois feuillus denses il est difficile d'obtenir une carbonisation complète, et le charbon produit risque d'avoir une teneur élevée en matières volatiles. Même avec une matière première de faible densité cette teneur est assez élevée, ce qui à vrai dire n'est pas un inconvénient pour un usage domestique local, mais si le charbon est destiné à être exporté seul l'emploi de fours métalliques appropriés permettra d'obtenir la haute qualité exigée par les acheteurs.

Un homme peut conduire jusqu'à une dizaine de ces petits fours. L'opération comporte une phase de carbonisation de 2 à 3 heures, suivie d'une phase de refroidissement d'environ 3 heures. Un ouvrier expérimenté peut faire deux cycles par jour avec 10 fûts produisant chacun jusqu'à 30 kg de charbon par jour. Autrement dit, un seul homme utilisant 10 fûts peut produire 1½ tonne de charbon par semaine de 5 jours, s'il dispose d'un approvisionnement suffisant en bois préparé.

Par comparaison avec les méthodes traditionnelles de carbonisation, les fours faits de fûts métalliques ont un coefficient de conversion relativement élevé, avec des rendements qui atteindraient 23% (par rapport au poids de bois sec) (8). Le principal inconvénient de la méthode est que le bois à carboniser doit être débité en morceaux de moins de 30 cm de long et d'un diamètre maximum de 5 cm pour obtenir des résultats satisfaisants. Cela implique un travail considérable de préparation de la matière première. Par ailleurs il est parfois difficile et coûteux de se procurer des fûts métalliques, et ils se brûlent assez rapidement en raison de la faible épaisseur du métal, et doivent être fréquemment remplacés.

Photo 25. Cornue faite de vieux fûts métalliques. Noter le tuyau pour recueillir le condensat, et le feu placé dans une tranchée. Ghana. Photo Lejeune.

8.3 Avantages et inconvénients des fours métalliques transportables

Par comparaison avec les charbonnières traditionnelles en meule ou en fosse, les fours métalliques transportables présentent les avantages suivants:

- La matière première est placée dans une enceinte étanche, ce qui permet de contrôler au maximum l'entrée d'air et la circulation des gaz au cours de la carbonisation.
- Un personnel même peu formé peut apprendre rapidement à utiliser ces fours.
- Il faut moins de surveillance que pour les charbonnières traditionnelles, qui exigent une présence constante.
- On peut obtenir de manière régulière des rendements de conversion moyens de 24%, y compris le poussier (par rapport au bois sec), alors que les charbonnières traditionnelles donnent des rendements capricieux, souvent inférieurs.

- Tout le charbon produit peut être récupéré, alors que dans les fosses et meules traditionnelles une partie se perd dans le sol, et le charbon récupéré contient souvent des impuretés, terre et pierres.
- Les fours métalliques transportables, s'ils sont conçus de manière que l'eau puisse s'écouler du couvercle, peuvent, à la condition que le sol soit bien drainé, être utilisés dans des régions de forte pluviométrie où les méthodes traditionnelles de carbonisation sont difficiles à employer.
- Ayant un maximum de maîtrise du processus, on peut carboniser une plus large gamme de matières premières, telles que bois de conifères, broussailles, troncs de cocotier, coques de noix de coco.
- Le cycle de carbonisation avec les fours métalliques ne dure au total que deux ou trois jours.

Les inconvénients des fours métalliques, par comparaison avec les charbonnières en terre traditionnelles, sont les suivants:

- Il faut disposer au départ d'un financement destiné à couvrir le coût de fabrication des fours. Il faut un minimum de personnel et d'équipement pour le travail du métal, et l'acier utilisé dans la construction des fours doit souvent être importé.
- Pour un empilage facile et un maximum de rendement, il faut apporter un certain soin à la préparation de la matière première. Le bois doit être tronçonné et éventuellement refendu aux dimensions voulues, et ensuite séché pendant au moins trois semaines.
- Les fours métalliques peuvent s'avérer difficiles à déplacer en terrain très accidenté; des pentes modérées peuvent cependant être aisément franchies.
- La durée de vie d'un four métallique n'est que de deux à trois ans.

Les avantages des fours métalliques transportables par comparaison avec les installations fixes, y compris les fours construits en briques, sont les suivants:

- Ils peuvent être facilement et fréquemment démontés, et déplacés en les roulant sur le sol, de façon à suivre les coupes de bois d'oeuvre, les éclaircies dans les peuplements artificiels ou les opérations de défrichement. On évite ainsi un transport laborieux et coûteux du bois jusqu'à un chantier de carbonisation centralisé.
- Le cycle total de production de ces installations fixes est de l'ordre d'une semaine, au lieu de deux ou trois jours pour les fours transportables.

Les inconvénients des fours métalliques par rapport aux fours construits en briques faites localement sont les suivants:

- Le coût de fabrication d'un four métallique transportable est généralement plus élevé que le coût de construction d'un four en briques de rendement comparable, ce qui est dû principalement au coût de la matière première. Il faut des devises étrangères dans le cas où l'acier doit être importé. La fabrication et l'entretien des fours métalliques nécessitent un atelier de tôlerie, et une main-d'oeuvre sachant travailler le métal.
- En raison de la meilleure isolation thermique offerte par les murs des fours en briques, il faut brûler une portion moindre de la charge de bois dans le processus de carbonisation, et le rendement de la conversion est en général légèrement plus élevé que celui obtenu avec les fours métalliques transportables. Les fours en briques permettent de carboniser des bois de gros diamètre, et exigent moins de travail de tronçonnage et de fendage.
- La récupération des sous-produits n'est pas possible avec les fours métalliques transportables, tandis qu'avec les fours en briques on peut avoir la possibilité de récupérer des goudrons condensables.
- La supervision et l'appui logistique sont plus aisés dans une unité de carbonisation centralisée utilisant des batteries de fours en briques fixes.

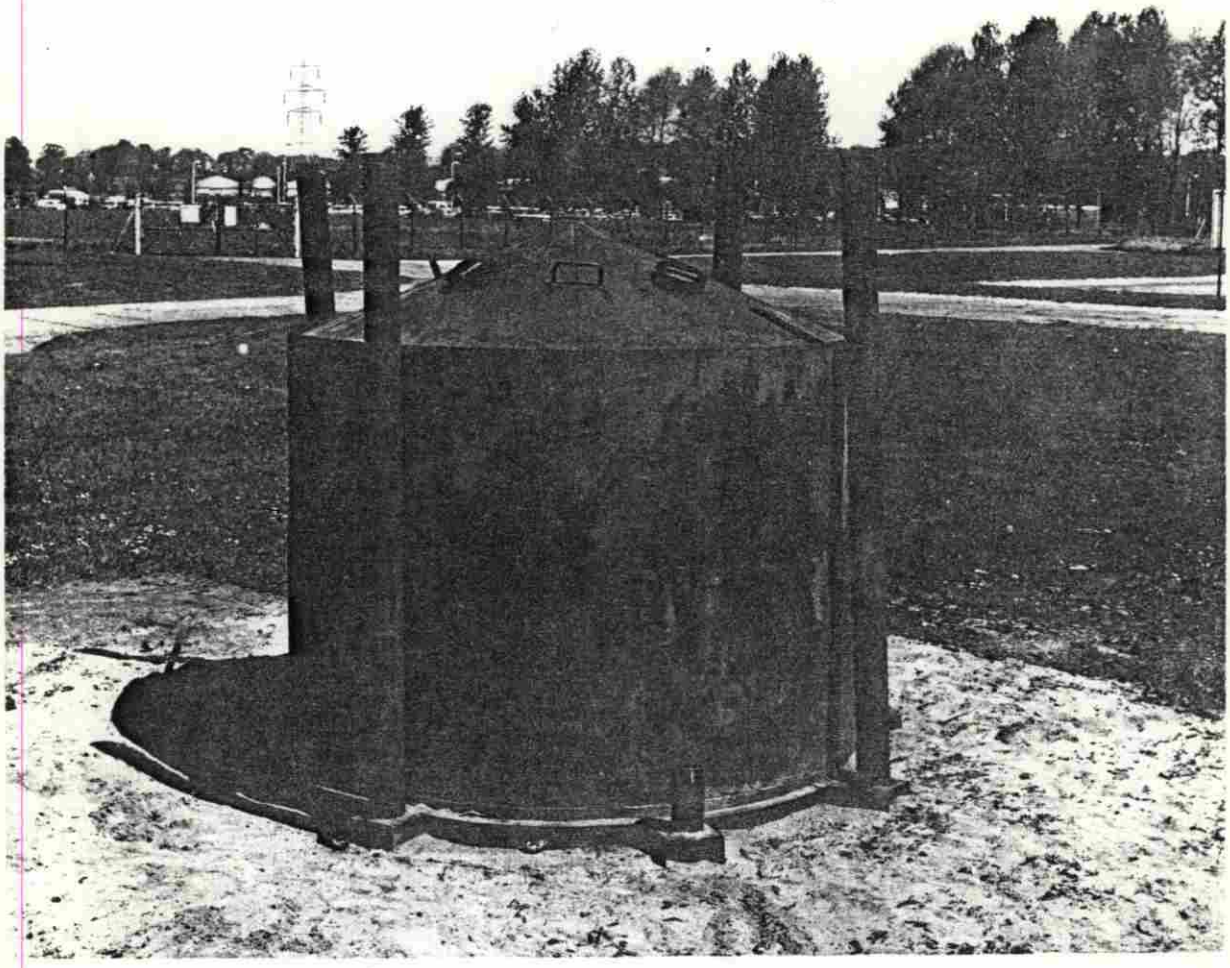


Photo 26. Four métallique transportable. Photo TPI.

8.4 Fabrication du four métallique modèle TPI

Le four se compose de deux sections cylindriques s'emboîtant entre elles, et d'un couvercle conique. Ce dernier est pourvu de quatre orifices d'échappement de vapeur régulièrement espacés, pouvant être obturés avec des tapes lorsque c'est nécessaire. Le four est posé sur hui conduits de tirage, disposés radialement autour de la base. Lors de la carbonisation, un conduit sur deux est muni d'une cheminée, soit en tout quatre cheminées.

La construction de ce four peut se faire localement, dans un atelier simple de tôlerie. Si l'on peut s'en procurer, on utilisera de la tôle d'acier Corten A de 3 mm d'épaisseur de préférence à l'acier doux, ses propriétés de résistance à la chaleur et à la rouille assurant une plus longue durée de vie utile du four.

8.5 Transport et mise en place des fours

Les fours peuvent être facilement transportés avec un camion à plateau. Pour transporter un four à l'arrière d'un véhicule pick-up, on peut emboîter les deux sections cylindriques l'une dans l'autre, en faisant entrer la section supérieure par la base de la section inférieure, et les charger en les roulant sur une rampe en bois. Le couvercle conique peut être placé à l'intérieur des cylindres, et le tout doit être solidement calé et arrimé.

Le déchargement des sections cylindriques doit se faire avec soin. Si on les laisse tomber du véhicule sur leur côté, elles ont des chances d'être déformées, et on éprouvera des difficultés à les assembler pour l'emploi. Une légère déformation peut être tolérée, mais si elle est plus accentuée il faudra y remédier en utilisant un cric de voiture entre deux morceaux de bois disposés suivant le diamètre de la section endommagée.

Pour économiser la main-d'oeuvre, il est recommandé d'avoir en service un groupe de deux ou plusieurs fours à distance assez faible l'un de l'autre pour permettre aux ouvriers de décharger et recharger un four pendant que les autres sont au stade de la carbonisation ou du refroidissement.

Pour éviter un transport inutile de bois, les fours doivent être fréquemment déplacés pour suivre la progression de la coupe. Les sections peuvent être roulées une par une par deux ou trois hommes, le plus souvent deux hommes poussant par derrière et un troisième devant pour guider. Pour placer les sections sur le côté avant de les rouler, il est recommandé d'utiliser des leviers en bois. Il est bien plus facile de rouler les sections que de les traîner horizontalement, même s'il ne s'agit que des déplacements d'un ou deux mètres. La manipulation de ces fours en forêt devient bien plus aisée avec l'expérience.

8.6 Choix et préparation de l'emplacement

On choisira un emplacement bien drainé, approximativement de niveau, d'environ trois mètres de diamètre, à proximité de la coupe. Il faut éviter les souches et grosses racines, éliminer les broussailles trop abondantes, et tasser le sol avec les pieds. On doit disposer à proximité de terre meuble ou de sable, pour boucher les entrées d'air du four pendant le fonctionnement. Une terre sableuse ou limoneuse est préférable; à défaut, on extraira du sable dans un cours d'eau voisin pour les premières opérations. Ce matériau pourra être réutilisé, et son volume s'accroîtra bientôt par incorporation de poussière de charbon et de cendre de bois produits lors des fournées successives.

8.7 Conditionnement du bois

Le bois doit être abattu, tronçonné et empilé au moins trois semaines avant d'être carbonisé, si l'on veut obtenir un rendement maximum en charbon de bois. Un bois sec nécessite un temps de carbonisation moins long, et donne un taux de conversion plus élevé. Les dimensions les plus convenables sont de 45 à 60 cm de long, et jusqu'à 20 cm de diamètre. On peut mettre des branches jusqu'à 90 cm de long, à condition que leur diamètre n'excède pas 13 cm, et que la densité d'empilage dans le four ne soit pas trop fortement diminuée. On peut utiliser des billes d'un diamètre voisin de 30 cm, à condition de les couper à une longueur maxima de 30 cm. Les bois de plus de 30 cm de diamètre doivent être refendus.

Il ne faut pas mélanger dans une même charge des branches de moins de 4 cm de diamètre avec des bois de très gros diamètre, mais les mettre avec des bois de petit et moyen diamètre. Il faut environ 7 stères de bois pour emplir le four.

Photo 27. Préparation du bois à carboniser. Noter la faible longueur des morceaux. Photo TPI.

8.8 Fonctionnement du four TPI

8.8.1 Outils nécessaires pour travailler à 2 - 3 hommes:

Scie à chaîne ou passe-partout
Pelles ou bêches (2)
Machette
Hache
Coins (2)
Masse
Perche ou madrier
Crible
Sacs
Aiguille et ficelle
Gants isolants

8.8.2 Assemblage et chargement du four

(a) La section inférieure du four est roulée jusqu'à l'emplacement préparé, et couchée en position de travail. En utilisant une perche en bois comme levier, on introduit en dessous les huit conduits d'air, côté ouvert vers le bas, radialement à intervalles équidistants, ce qui se fait facilement en plaçant les quatre premiers à intervalle de 90°, et les quatre autres entre. Les conduits doivent pénétrer d'au moins 25 cm à l'intérieur du four pour éviter une surchauffe de la paroi.

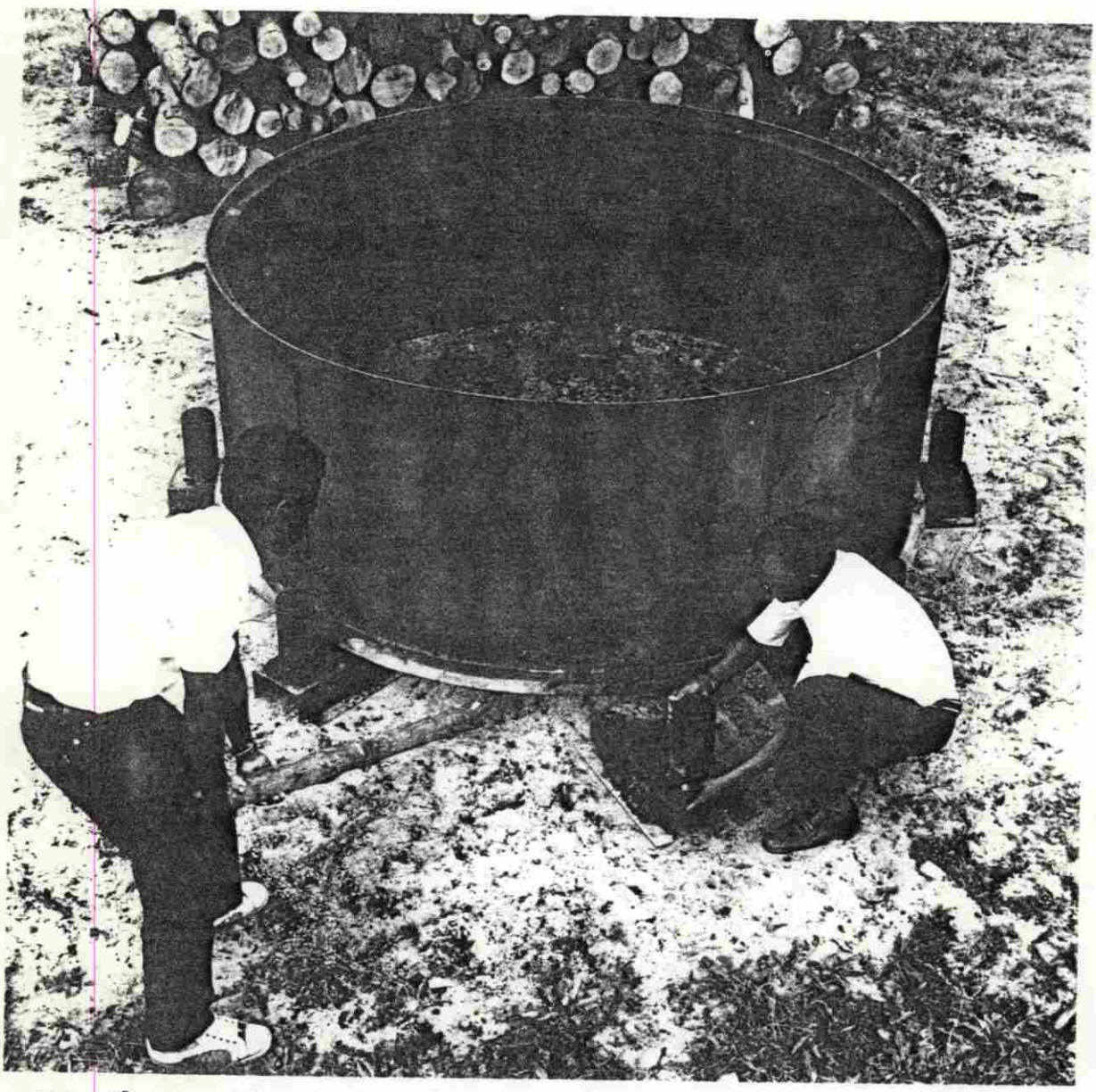


Photo 28. Assemblage du four métallique. Photo TPI.

Le collet situé sur le dessus du conduit ne doit pas être incliné vers la paroi du four, sinon il sera difficile d'y emboîter la cheminée une fois le four assemblé. Lorsque les conduits sont en place, il faut vérifier que leur ouverture est bien dégagée.

(b) On commence à charger le fond du four en s'assurant que les extrémités des conduits et les espaces entre eux ne sont pas obstrués par les bois. Pour cela, on fait reposer la charge sur des longerons, qui sont des rondins de diamètre moyen (15 cm) disposés radialement comme les rayons d'une roue.

Photo 29. Rondins disposés radialement pour servir de soubassement à la charge.Photo TPI.

(c) Suivant quatre rayons de la base on place entre les longerons, depuis la périphérie jusqu'au centre, du petit bois d'allumage bien sec ainsi que des déchets inflammables (papier, huile de vidange, etc.)

Photo 30. Des déchets inflammables sont placés entre les rondins pour fournir quatre points d'allumage. Photo TPI.

(d) Par-dessus ces matériaux d'allumage, on pose en croix sur les longerons des bois de petit et moyen diamètre et des fumerons (bois incomplètement carbonisés provenant d'une fournée précédente). Cette première couche est complétée par d'autres bois de petit et moyen diamètre couvrant tous les longerons visibles.

Les canaux formés par l'espace entre les longerons sur lesquels repose la charge permettant au feu de se propager plus rapidement vers le centre du four.

Photo 31. Chargement du bois dans le four. Photo TPI.

(e) La section inférieure du four est chargée avec des couches successives de bois, en garnissant le plus possible les vides et en plaçant les plus gros bois vers le centre. Lorsque cette section est pleine, on nettoie bien les surfaces de jonction, et on roule la section supérieure contre la section inférieure, puis on la soulève en la poussant en position sur son rebord d'appui.

(f) On continue le chargement du four jusqu'à ce que les bois forment un cône aplati au-dessus du bord de la section supérieure, tout en permettant d'y poser le couvercle sans obstacle. On roule alors le couvercle contre le four, et on le soulève et le pousse sur son rebord d'appui. Deux hommes expérimentés peuvent charger le four en deux heures environ.

8.8.3 Allumage du four.

(a) Après s'être assuré que les quatre orifices de sortie de vapeur du couvercle sont bien ouverts, on allume le feu aux quatre points d'allumage. Lorsqu'il y a du vent, la partie du four située au vent brûlera plus rapidement. On en tiendra compte en n'allumant du côté au vent que lorsque le côté du four sous le vent sera bien allumé.

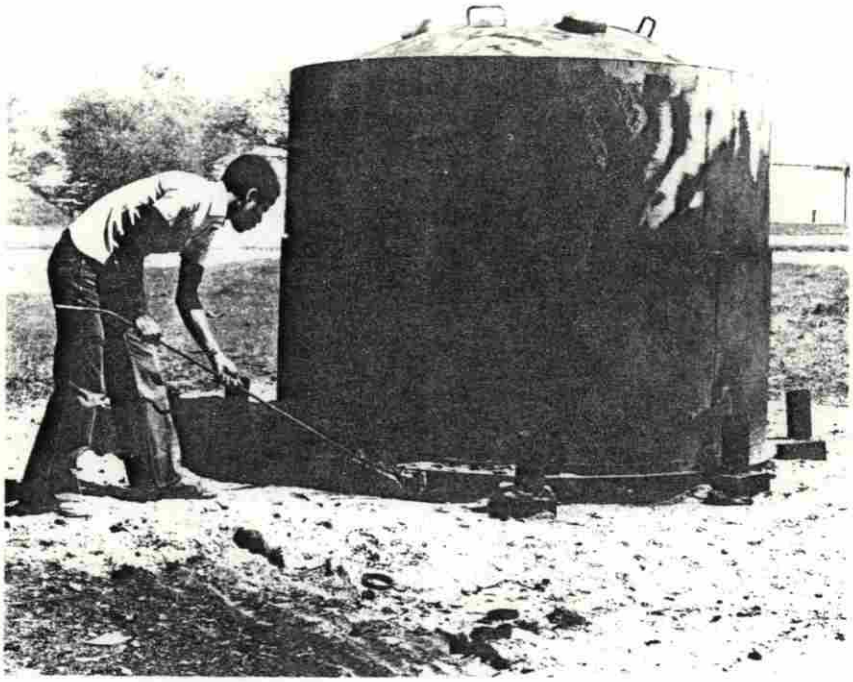


Photo 32. Allumage du four. Photo TPI.

(b) On laisse le four brûler librement pendant une trentaine de minutes, jusqu'à ce que la paroi de la section inférieure soit chaude au point qu'il devienne pénible de rester près du four. Pendant cette phase il se dégage une vapeur abondante par les quatre orifices du couvercle. On remplit pendant ce temps les joints entre les sections du four avec du sable ou de la terre, et on emboîte les quatre cheminées en position sur les embases d'un conduit sur deux.

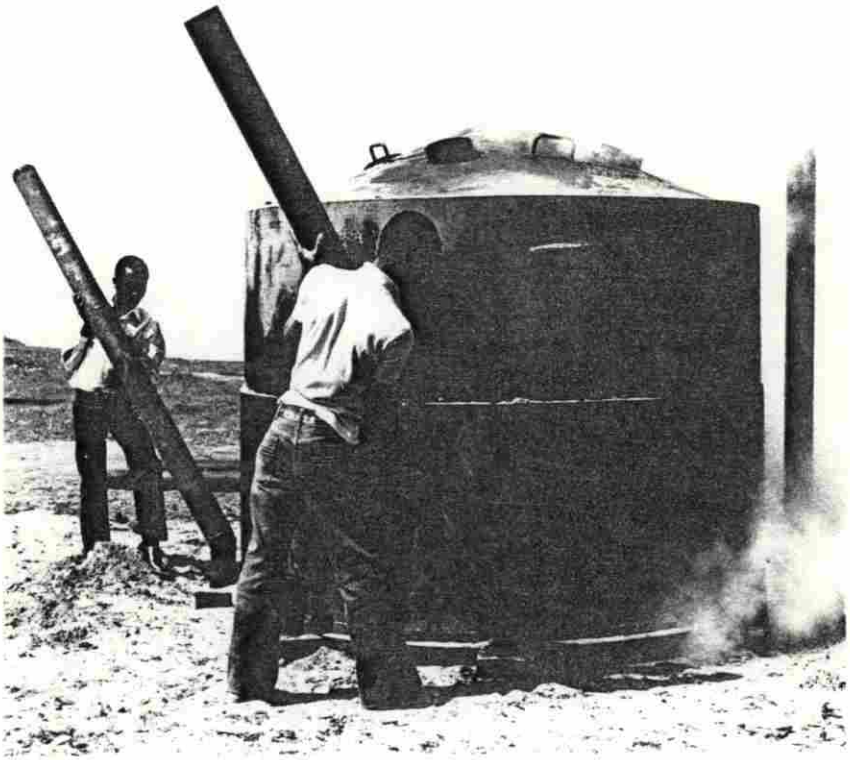


Photo 33. Les joints entre les sections du four sont remplis de sable ou de terre, et les cheminées sont mises en place. Photo TPI.

8.8.4 Réduction du tirage.

Au fur et à mesure que les différents secteurs du four atteignent la température requise, on remplit les espaces entre les conduits avec du sable ou de la terre. Lorsqu'ils sont tous bouchés, on obture l'extrémité des quatre conduits supportant les cheminées. Les orifices de sortie de vapeur sont alors fermés, de telle sorte que la fumée soit aspirée par les quatre cheminées en passant par la base du four. Lorsque le tirage a été ainsi réduit, l'air ne pénètre plus dans le four que par les conduits d'admission, et de là il monte en passant par le centre de la charge. Les gaz de combustion, aspirés par le tirage, descendent le long de la paroi extérieure du four, et s'échappent par les cheminées. L'air et les gaz brûlés circulant dans des directions opposées, le tirage est dit inversé.

Photo 34. Circulation de l'air et des gaz chauds dans le four. Photo TPI.

8.8.5 Contrôle de la carbonisation.

(a) Toutes les cheminées doivent émettre une colonne de fumée blanche épaisse 15 à 30 minutes après qu'on ait établi le tirage inversé. Pendant toute la durée de la carbonisation il est recommandé de s'assurer que la température reste égale sur toute la circonférence du four. Le contrôle est plus aisé lorsque les fours sont situés dans un lieu abrité. S'il y a un fort vent, les températures d'un côté à l'autre du four peuvent devenir inégales, et il faudra alors obturer partiellement ou complètement un ou deux conduits d'entrée d'air du côté au vent. Lorsqu'on opère par temps de pluie, ou avec du bois vert par fort vent, il sera plus difficile d'arriver à équilibrer la combustion dans le four au début de la phase de carbonisation. Dans ces conditions de grandes quantités d'eau s'évaporeront du sol et du bois du côté le plus chaud, et se condenseront dans les parties les moins chaudes du four. Cette eau risque d'éteindre le feu pouvant subsister aux points d'allumage, et d'abaisser encore plus la température dans ces zones.

Pour y remédier, on doit boucher temporairement les entrées d'air sur le côté chaud du four, et dégager les espaces entre les conduits du côté le plus froid, afin d'y augmenter l'admission d'air. Cela attirera le feu vers le côté le moins chaud du four et, une fois que la température y aura suffisamment monté, on pourra reboucher l'espace entre les conduits, après quoi on pourra reprendre la méthode normale de contrôle de l'admission d'air.

Il importe de ne jamais laisser un four allumé sans surveillance lorsque les espaces entre les conduits d'entrée et de sortie sont dégagés, ce qui pourrait avoir pour conséquence de sérieux dégâts au four.

Lorsqu'on utilise du bois humide, ou que l'on travaille par temps de pluie, la phase de carbonisation risque de se prolonger jusqu'à 48 heures. En raison de la quantité supplémentaire de bois qu'il faut brûler pour éliminer l'eau en excès, on doit alors s'attendre à des rendements en charbon moins élevés.

(b) Au cours de la carbonisation une certaine quantité de goudron se dépose dans les conduits de sortie et les cheminées, et les obstrue. Lorsqu'on note une diminution importante de la quantité de fumée qui sort d'une cheminée, il faut la déboucher, en la sortant de son support avec l'aide de gants isolants ou d'un vieux sac. En même temps on introduira un long bâton à travers le conduit jusqu'au centre du four, pour s'assurer qu'il n'y a aucune obstruction interne.

A un certain moment de la phase de carbonisation (en général 8–10 heures après l'allumage), les cheminées doivent être transférées sur les quatre conduits adjacents, de telle sorte que les conduits d'entrée d'air deviennent des conduits de sortie de fumée, et vice versa. Cela assure une carbonisation plus uniforme, et diminue la formation de cendres dans les zones où l'air pénètre dans le four.

(c) La carbonisation est terminée lorsque la couleur de la fumée de toutes les cheminées prend une teinte bleutée et devient presque limpide, ce qui se produit normalement 16 à 24 heures après l'allumage. A ce stade toute la surface du four doit être très chaude (150° - 200°C), de telle sorte que de l'eau jetée sur la paroi s'évapora immédiatement en grésillant. On ferme alors complètement le four en vue du refroidissement.

Pour cela on enlève les cheminées, et on bouche totalement les conduits avec de la terre ou du sable. Si nécessaire, on rajoute de la terre ou du sable sur les joints des sections du four et sur les orifices de sortie de vapeur, pour assurer une étanchéité totale et éviter toute entrée d'air. On laisse refroidir le four entre 16 et 24 heures avant de l'ouvrir et le décharger. Le refroidissement sera grandement accéléré s'il pleut.

8.8.6 Déchargement du four.

(a) Le four ne doit être ouvert que lorsque son contenu est refroidi, et que sa surface externe est froide au toucher. Un ensoleillement direct peut masquer ce refroidissement, et on appréciera alors mieux la température interne du four en tâtant la surface de la section inférieure en un point situé à l'ombre. Il faut ensuite apprécier la température du reste de la section inférieure pour s'assurer qu'il n'y a pas de "points chauds". Si le contenu du four est encore chaud après une période de refroidissement de 24 heures, c'est que l'étanchéité n'a pas été réalisée de façon parfaite, et il faut s'efforcer d'y remédier. Par ailleurs, si en ouvrant le four on constate qu'une partie du charbon est encore enflammée, il faut le refermer pour une nouvelle période de refroidissement.

Le charbon doit être sorti immédiatement dès que le four n'est plus fermé hermétiquement, même si son contenu paraît complètement refroidi. Tout retard pourrait avoir pour conséquence une réinflammation localisée du charbon et, outre une perte de charbon, des dégâts sérieux au four.

(b) Au cours de la carbonisation, le volume du bois diminue de la moitié environ de sa valeur initiale, et on pourra alors enlever le couvercle et la section supérieure du four une fois qu'il sera refroidi, laissant le charbon dans la section inférieure.

Le couvercle peut être enlevé avec un minimum d'effort en le soulevant d'un côté et en introduisant par dessous l'extrémité d'une longue branche ou d'un madrier, que l'on pourra utiliser comme une rampe sur laquelle on laissera doucement glisser le couvercle jusqu'au sol. La même méthode sera employée pour enlever la section supérieure du four.

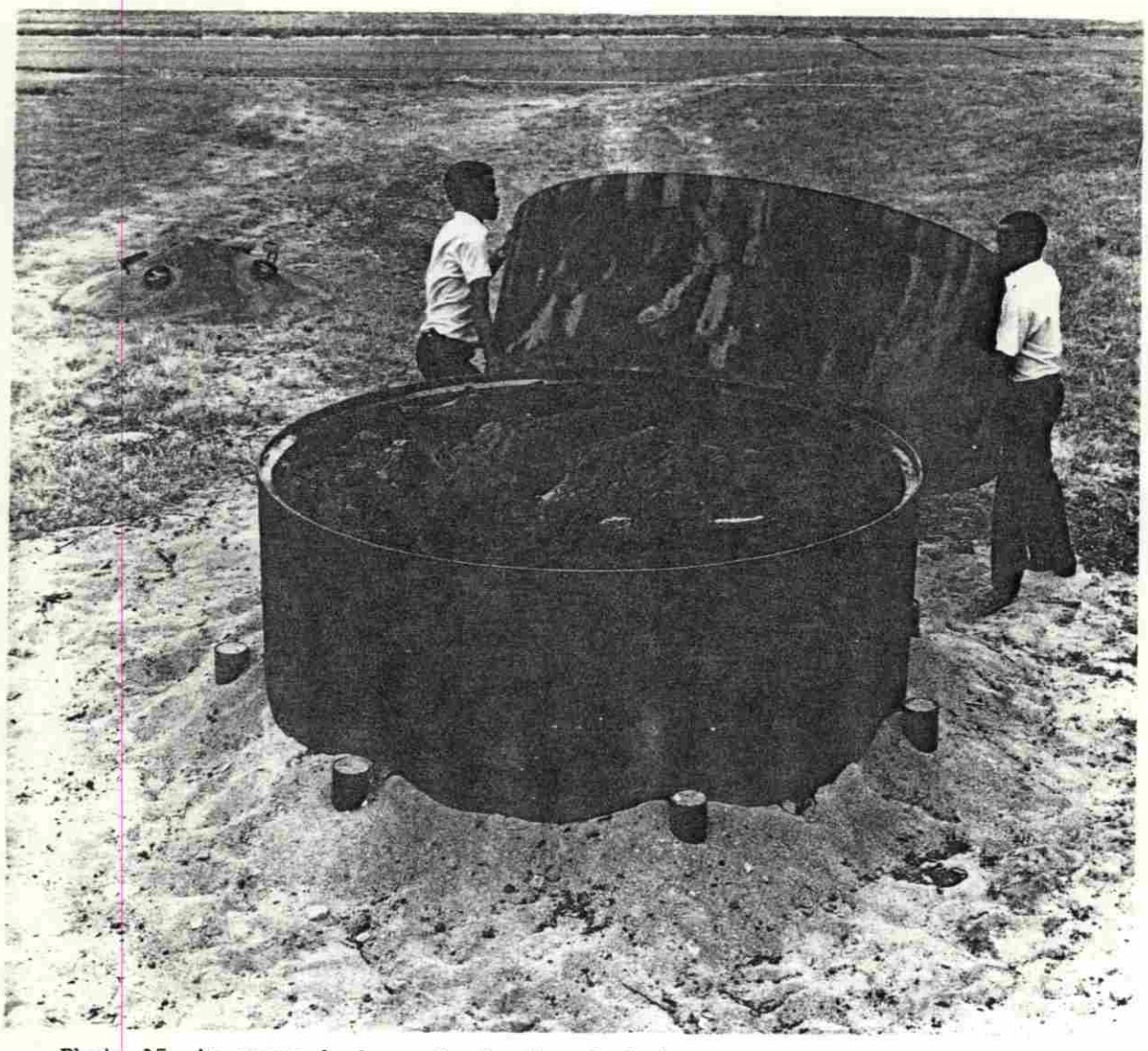


Photo 35. Au cours de la carbonisation le bois a perdu environ la moitié de son volume initial. Photo TPI.

(c) Pour enlever la section inférieure, on commence par enlever les conduits d'un côté du four, en s'aidant d'un levier. En appliquant ensuite le levier de l'autre côté, on pourra basculer la section inférieure sur la tranche, ce qui dégagera le charbon. Il faut, lorsqu'on décharge le four, avoir sous la main un seau d'eau, ou bien du sable ou de la terre, pour éteindre tout petit feu éventuel.

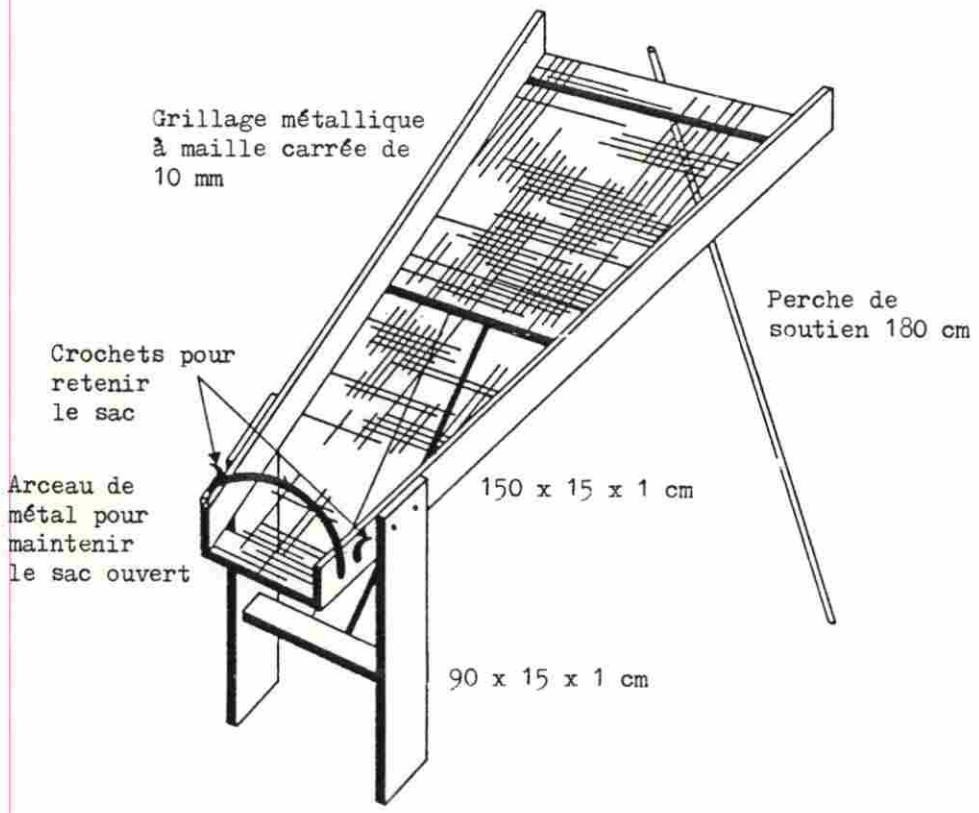
8.8.7 Ensachage du charbon.

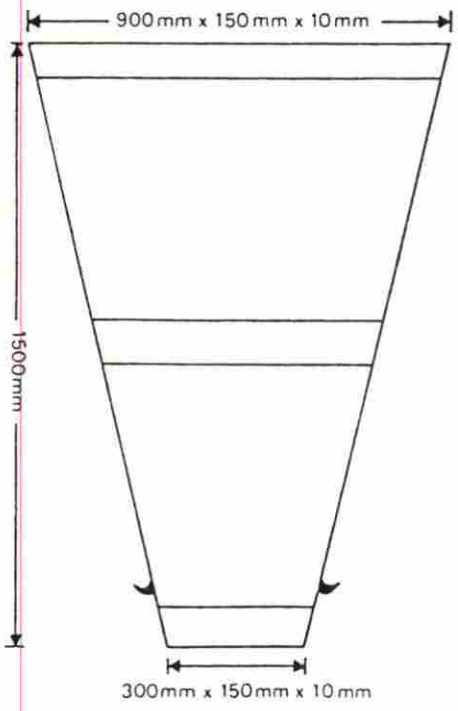
Pour accélérer cette opération il faut utiliser un crible incliné pour séparer les gros morceaux de charbon des débris et du poussier. La figure 11 montre comment confectionner ce crible.

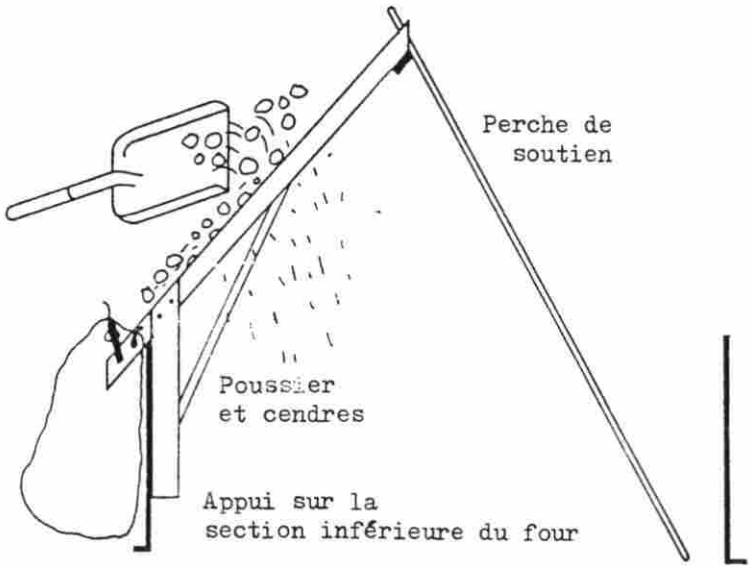
Il est recommandé de placer la section inférieure du four du côté sous le vent du charbon et d'y poser le crible, ce qui non seulement accroîtra la stabilité de celui-ci mais encore protègera l'ouvrier du poussier.

On peut aussi au besoin utiliser un crible incliné monté sur des pieds. Deux hommes peuvent cribler le charbon d'une fournée et remplir les sacs en une heure environ.

Fig. 11. Crible pour ensacher le charbon de bois







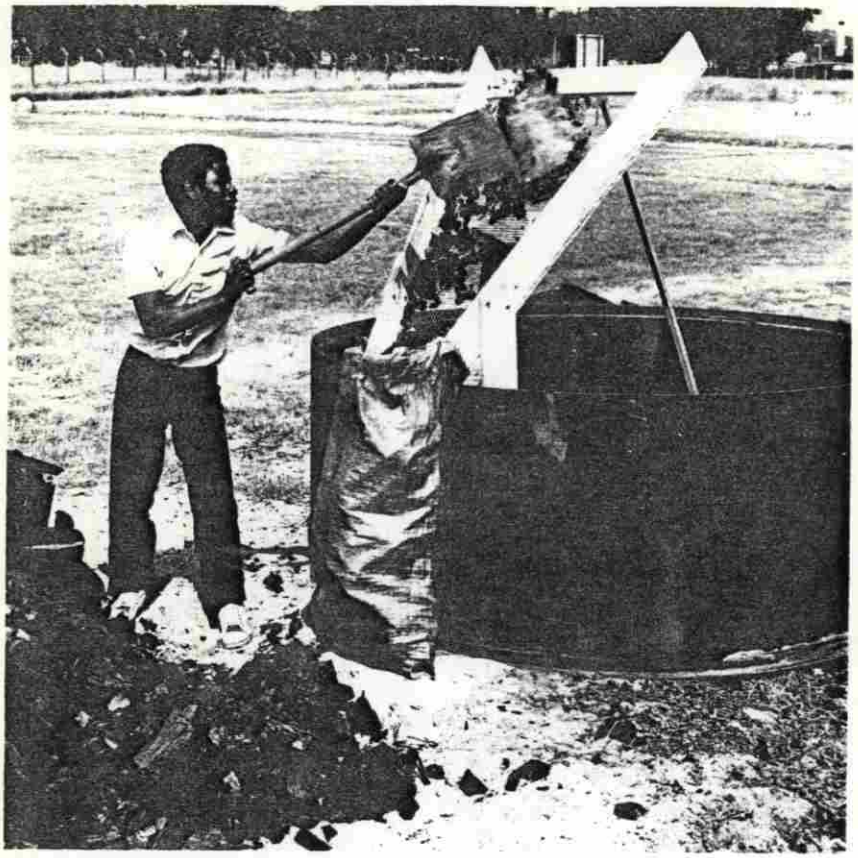


Photo 36. Crible servant à séparer les morceaux de charbon du poussier et autres parties fines. Photo TPI.

8.9 Autre manière d'opérer

L'allumage du four à partir du sommet est une méthode particulièrement indiquée pour carboniser du petit bois ou des coques de noix de coco, du fait qu'elle assure une bonne circulation des gaz à travers la charge.

8.9.1 Chargement.

Le four est chargé comme décrit précédemment, mais sans mettre de bois d'allumage entre les rondins de la base. On le place dans une cavité de 25 cm de profondeur au sommet de la charge, et on recouvre avec une dernière couche de bois.

Lorsqu'on carbonise des coques de noix de coco il n'est pas nécessaire d'utiliser de rondins comme longerons. Il faut veiller à ce que l'orifice intérieur des conduits ne soit pas obstrué par les coques. A cet effet, on place au-dessus un morceau de bois plat, ou un tronçon de nervure de palme, avant de couvrir avec des coques.

8.9.2. Allumage.

On met le feu à la charge par l'un des qautre orifices de sortie de vapeur, et on la laisse brûler en permettant un libre accès de l'air à la base du four. La fumée sort par les quatre orifices du couvercle. On laisse ainsi brûler pendant deux heures environ, jusqu'à ce que la totalité de la section supérieure soit trop chaude pour la toucher avec la main.

8.9.3 Réduction du tirage.

Lorsque la section supérieure du four est suffisamment chaude, on bouche les espaces entre les conduits avec du sable ou de la terre, on place les cheminées en position, et on obture les orifices de sortie de vapeur. Le tirage inversé et le contrôle de l'admission d'air dans le four sont obtenus comme dans la méthode normale décrite ci-dessus.

8.10 Plan de travail pour une opération commerciale

Deux hommes expérimentés peuvent servir deux fours métalliques transportables produisant 2-3 tonnes de charbon de bois par semaine. Suivant les conditions locales et les moyens disponibles, une assistance peut être nécessaire pour couper le bois et déplacer les fours, et dans certains cas la présence dans l'équipe d'un troisième homme, de préférence un abatteur à la scie à chaîne, peut être nécessaire.

L'expérience montre que les entreprises de carbonisation utilisant des fours métalliques transportables les plus prospères sont celles qui offrent à leur personnel un maximum d'incitations. On peut citer comme exemple une coopérative dont les membres sont propriétaires de leurs fours, et reçoivent la plus grande partie du produit des ventes de charbon.

Un programme hebdomadaire de 5 jours de travail est esquissé ci-dessous. On peut y apporter des modifications pour tenir compte d'horaires journaliers différents, et d'une semaine de travail de 6 jours. En outre, si un arrangement peut être fait avec quelqu'un habitant près de la zone de production, pour boucher les fours pendant les fins de semaine moyennant une demi-heure de travail léger, on pourra faire des fournées supplémentaires.

Lundi	08.00-10.00	Four 1 et Four 2	Décharger les 2 fours.
	10.00-12.00	Four 1	Charger le four.
	12.00-13.00	Four 1	Allumer le four et réduire le tirage.
	13.00-17.00	Four 1	Contrôler la carbonisation.
			Changer et nettoyer les cheminées à 16.30.
		Four 2	Charger le four.
Mardi	08.00-08.30	Four 1	Changer et nettoyer les cheminées.
	08.30-11.00		Préparer les bois pour les prochaines fournées.
	11.00-12.00	Four 2	Allumer le four et réduire le tirage.
	12.00-17.00	Four 2	Contrôler la carbonisation.
			Changer et nettoyer les cheminées à 16.30.
		Four 1	Fermer le four lorsque la carbonisation est achevée.
			Préparer le bois pour les prochaines fournées.
Mercredi	08.00-08.30	Four 2	Changer et nettoyer les cheminées.
	08.30-14.00		Préparer le bois pour les prochaines fournées.
	14.00-15.00	Four 1	Défourner le charbon.
	15.00-17.00	Four 1	Commencer à charger le four.
		Four 2	Fermer le four lorsque la carbonisation est achevée.
Jeudi	08.00-10.00	Four 1	Finir de charger le four
	10.00-11.00	Four 1	Allumer le four et réduire le tirage.
	11.00-13.00	Four 2	Défourner le charbon.
		Four 1	Contrôler la carbonisation.
	13.00-15.00	Four 2	Charger le four.
		Four 1	Contrôler la carbonisation.
	15.00-16.00	Four 2	Allumer le four et réduire le tirage.
	16.00-17.00	Four 1	Changer et nettoyer les cheminées.
		Four 2	Contrôler la carbonisation.
Vendredi	08.00-09.00	Four 1 et Four 2	Changer et nettoyer les cheminées.
	09.00-13.00	Four 1	Fermer le four lorsque la carbonisation est achevée.
			Préparer le bois pour les prochaines fournées.
		Four 2	Changer et nettoyer les cheminées à 12.30.
	13.00-17.00		Préparer le bois pour les prochaines fournées.
		Four 2	Fermer le four lorsque la carbonisation est achevée.

8.11 Les erreurs les plus courantes dans la conduite de la carbonisation

(a) Ne pas introduire les conduits assez profondément sous le bord de la section inférieure lors de l'assemblage du four. Les températures élevées qui se produisent à l'orifice intérieur du conduit d'entrée d'air occasionnent de sérieux dégâts à la paroi du four s'il n'est pas maintenu une distance suffisante entre la zone chaude et la paroi.

(b) Flux gazeux insuffisant à l'intérieur du four, du fait que l'on a négligé de nettoyer les dépôts de goudron dans les conduits et les cheminées. Il en résulte une température trop basse du four, et un allongement du temps de carbonisation.

(c) Durée excessive de la période de refroidissement, ce qui réduit le nombre de fournées possible dans la semaine de travail.

(d) Répugnance à déplacer le four pour le rapprocher des coupes, d'où gaspillage de temps et d'efforts pour amener le bois jusqu'au four.

(e) Provision de bois insuffisante auprès du four pour le recharger immédiatement dès que l'opération précédente est terminée.

(f) Laisser un feu intense se propager contre la paroi du four lors de l'allumage, ce qui restreint en général le flux d'air sous le four et empêche le feu de s'étendre rapidement vers le centre de la charge, et peut aussi endommager sérieusement la paroi du four. Une fois que le bois d'allumage a été enflammé à l'intérieur du four, un flux maximum d'air est tout ce qui est normalement nécessaire.

(g) Ensachage long et laborieux à la main, morceau par morceau, au lieu d'utiliser des pelles et un crible. Un temps de déchargement trop long entraîne un retard au rechargement du four et au démarrage de la fournée suivante.

8.12 Rendements en charbon de bois

Le poids de charbon produit à chaque fournée avec un four métallique transportable est en relation avec différents facteurs physiques. Les principaux facteurs qui contribuent à un rendement maximum sont les suivants:

- densité du bois élevée;
- faible teneur en humidité du bois;
- travail par temps sec, avec un four placé sur un terrain sec bien drainé;
- bon coefficient de remplissage de la charge, grâce à une taille et une forme régulière des bois.

En pratique, il est rare que toutes ces conditions puissent être réunies, et en conséquence les rendements indiqués varient dans une large mesure (7, 10, 18, 31).

Dans des programmes de formation organisés dans sept pays par le Tropical Products Institute, on a obtenu un rendement moyen en charbon, poussier compris, de 26% par rapport au poids de bois sec. Le poids maximum de charbon obtenu en une seule fournée a été observé en Guyane, où 1 083 kg de charbon de bois ont été produits à partir de 3 852 kg (poids sec) de rondins de taille uniforme de bois feuillu dense. La teneur en humidité du bois utilisé était d'environ 25% (par rapport au poids humide). Cela correspond à un rendement de conversion (par rapport au poids sec) de 28,12%. Les rendements les plus élevés ont été obtenus dans la région côtière aride d'Equateur, où on a observé un taux de conversion de 31,40%.

A l'inverse, le poids de charbon le plus faible dans une fournée a été obtenu au Soudan, à partir de déchets de dosses de résineux. 297 kg de charbon seulement ont été produits à partir d'un poids estimé de 1 568 kg de bois sec, soit un rendement à la carbonisation de 18,94%. La teneur en humidité du bois, consistant en dosses fraîchement sciées était d'environ 57% (par rapport au poids humide).

8.13 Durée de vie d'un four métallique transportable

La longévité d'un four dépend dans une large mesure du soin et de la compétence des utilisateurs. Lorsqu'un four n'est pas utilisé par son propriétaire, mais par des travailleurs occasionnels, ceux-ci seront peu incités à éviter les dégâts en cours d'opération. De même, une formation insuffisante des ouvriers risque de nuire à la longévité des fours.

L'expérience a montré jusqu'à présent qu'on pouvait attendre de ces fours une durée de vie de trois ans en travail continu. Après ce temps, le cylindre inférieur doit en général être remplacé, ou nécessite des réparations importantes. La section supérieure et le couvercle sont soumis à une action moins violente de la chaleur, et à condition d'en prendre soin lors du transport et de l'assemblage ils devraient avoir une durée d'utilisation plus longue. En Afrique Occidentale, un four de modèle TPI en utilisation continue ne montrait au bout de deux ans que de faibles déformations dans le bas de la section inférieure, tandis que la section supérieure et le couvercle étaient encore en parfait état.

Les éléments du four qui souffrent le plus sont les huit conduits d'entrée d'air et de sortie de fumée. Les températures élevées subies par l'extrémité intérieure du conduit déforment localement le métal. Les conduits doivent être redressés périodiquement, et il sera certainement nécessaire de les remplacer après trois années d'usage continu.

Chapitre 10

UTILISATION RATIONNELLE DU CHARBON DE BOIS

L'utilisation du charbon de bois sera d'autant plus profitable qu'il sera brûlé plus efficacement, et que sa qualité sera optimale pour l'usage auquel on le destine.La qualité du charbon de bois peut être définie et mesurée de diverses manières, qui découlent en général des exigences de telle ou telle utilisation. L'efficacité de l'utilisation signifie normalement le transfert d'une proportion maximale du pouvoir calorifique du charbon de bois à la matière à chauffer, qu'il s'agisse d'eau pour la cuisson des aliments, de l'air d'une pièce d'habitation, ou de la charge d'un haut-fourneau. Elle est conditionnée par l'emploi d'appareils de combustion appropriés.

10.1 Qualité du charbon de bois

Le marché le moins exigeant à l'égard de la qualité du charbon de bois est celui des combustibles ménagers. Les raisons en sont que le rendement de la combustion est difficile à mesurer, que le pouvoir des consommateurs individuels de définir et obtenir une bonne qualité de charbon de bois est très réduit, et enfin qu'il y a une certaine possibilité de compromis entre qualité et prix, dont le consommateur use pour satisfaire au mieux ses besoins. Cela ne veut pas dire, toutefois, qu'il ne vaille pas la peine d'effectuer un contrôle de qualité. A la condition qu'il ne perde pas son efficacité dans les méandres de la bureaucratie, un système de contrôle de qualité du charbon de bois peut permettre de tirer un rendement maximum des ressources ligneuses, tout en garantissant au consommateur ménager des résultats satisfaisants.

Les gros utilisateurs tels que l'industrie sidérurgique, en revanche, savent par expérience et par les résultats de leurs recherches quelles sont les caractéristiques qu'ils doivent rechercher dans le charbon de bois, et ont les moyens, par leurs possibilités d'achats concentrés et par leur maîtrise d'une partie au moins de leur propre production de charbon, de s'assurer que le charbon de bois qu'ils utilisent est bien conforme à leurs spécifications, et leur permet de produire de la fonte à un prix de revient minimum.

La plupart des spécifications qui interviennent dans le contrôle de qualité du charbon de bois proviennent de l'industrie sidérurgique ou de l'industrie chimique. Lorsque le charbon de bois est exporté, les acheteurs ont tendance à faire usage de ces normes de qualité industrielles, quand bien même le principal débouché de ce charbon serait le combustible à usage domestique ou le charbon pour barbecue. Ce fait ne doit pas être perdu de vue, en effet les exigences ne sont pas toujours indentiques pour un usage industriel ou un usage domestique, et une appréciation judicieuse des exigences de qualité du marché réel peut permettre de fournir un charbon convenable à plus bas prix ou en plus grandes quantités, au bénéfice tant de l'acheteur que du vendeur.

La qualité du charbon de bois se définit par diverses caractéristiques, qui, bien que liées entre elles dans une certaine mesure, sont mesurées et évaluées séparément. Ces divers facteurs de qualité sont détaillés ci-dessous.

10.1.1 Teneur en humidité

Le charbon de bois fraîchement défourné renferme très peu d'humidité, en général moins de 1%. L'absorption d'humidité provenant de l'atmosphère est rapide, et il se produit un gain qui même en l'absence de pluie peut au bout d'un certain temps porter la teneur en humidité à 5 ou 10%, même avec un charbon bien carbonisé. Lorsque la carbonisation est moins poussé, ou que des acides pyroligneux et des goudrons solubles lessivés par la pluie ont imprégné le charbon, comme cela peut se produire dans les charbonnières en meule ou en fosse, son hygroscopicité se trouve accrue, et la teneur en humidité d'équilibre peut s'élever jusqu'à 15% ou même davantage. L'humidité altère la qualité du charbon de bois, faisant baisser son pouvoir calorifique. Lorsque le charbon est vendu au poids, les commerçants malhonnêtes le mouillent souvent, ce qui augmente son poids sans guère affecter son volume et son aspect. C'est pourquoi les acheteurs en gros préfèrent acheter le charbon de bois soit au volume brut,soit au poids en déterminant la teneur en humidité par des essais de laboratoire et en ajustant le prix en conséquence.

Dans le petit marché de détail, la vente se fait souvent par morceaux.

Il est pratiquement impossible d'éviter que le charbon ne soit mouillé accidentellement par la pluie au cours du transport, mais il est bon de le conserver sous abri même si on l'a acheté au poids, parce que l'eau qu'il contient doit être évaporée lors de la combustion, et représente une perte directe de pouvoir calorifique. En effet la vapeur d'eau produite s'échappe par le conduit de tirage, et il est rare qu'elle se condense en restituant sa chaleur de manière utile.

Les specifications de qualité pour le charbon de bois fixent généralement une limite de teneur en humidité, de l'ordre de 5 à 15% du poids brut. On détermine la teneur en humidité en séchant à l'étuve un échantillon de poids connu; on l'exprime en pourcentage du poids humide initial.

Un charbon de bois à forte teneur en humidité (10% ou plus) montre une tendance à se fragmenter et à former du poussier lorsqu'on le chauffe dans un haut-fourneau, et ne convient pas pour la production de fonte.

10.1.2 Matières volatiles autres que l'eau

En dehors de l'eau, les matières volatiles contenues dans le charbon de bois comprennent tous les résidus liquides et goudronneux qui ne sont pas totalement éliminés lors de la carbonisation. Si celle-ci est prolongée et se fait à haute température, la teneur en matières volatiles est faible. Lorsque la température de carbonisation est peu élevée et que le temps de séjour dans le four est bref, cette teneur augmente.

Ces effets se traduisent dans le rendement en charbon à partir d'un poids donné de bois. A basse température (300°C) un rendement en charbon de bois proche de 50% est possible. A une température de carbonisation de 500° - 600°C la teneur en matière volatiles est plus faible, et un rendement de 30% avec un four-cornue est normal. A très haute température (de l'ordre de 1.000°C), enfin, la teneur en matières volatiles est voisine de zéro, et le rendement tombe à près de 25%. Comme on l'a indiqué plus haut, le charbon de bois peut réabsorber les goudrons et l'acide pyroligneux lessivés par la pluie dans les charbonnières en fosse ou analogues; un charbon peut par conséquent avoir été bien carbonisé, mais avoir une teneur élevée en matières volatiles en raison de ce facteur. Il en résulte une variation supplémentaire de la qualité du charbon de bois fait en fosse sous un climat pluvieux. Les acides réabsorbés rendent le charbon corrosif et entraînent une pourriture des sacs en jute - fâcheuse lors du transport. En outre ce charbon ne brûle pas avec une flamme claire.

La teneur en matières volatiles du charbon de bois peut varier entre un maximum de 40% ou plus et un minimum de 5% ou moins. On la mesure en chauffant à l'abri de l'air un échantillon de poids connu de charbon sec à 900°C jusqu'à constance du poids. La perte de poids correspond aux matières volatiles. La teneur en matières volatiles est généralement spécifiée sans humidité.

Un charbon de bois à teneur élevée en matières volatiles s'enflamme facilement, mais 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 (c'est-à-dire sans humidité) de l'ordre de 30%. Une teneur élevée en matières volatiles donne un charbon moins friable que le charbon ordinaire à carbonisation poussée et faible teneur en matières volatiles, et produisant par conséquent moins de poussier lors du transport et des manipulations. Il est également plus hygroscopique, et a donc une teneur en humidité d'équilibre plus élevée.

10.1.3 Teneur en carbone pur

La teneur du charbon de bois en carbone pur varie entre un minimum de l'ordre de 50% et un maximum de l'ordre de 95%. Le charbon de bois est par conséquent composé principalement de carbone. La teneur en carbone est généralement estimée par différence, autrement dit on retranche de 100 les pourcentages de tous les autres constituants, et on admet que le reste est le pourcentage de carbone pur. La teneur en carbone pur est l'élément le plus important en métallurgie, étant donné que c'est lui qui est responsable de la réduction des oxydes de fer du mineral. Mais l'industriel doit faire un compromis entre la friabilité du charbon à haute teneur en carbone pur et la plus grande résistance du charbon à teneur plus faible en carbone pur, plus élevée en matières volatiles, de façon à obtenir la meilleure marche du haut-fourneau.

10.1.4 Teneur en cendres

On détermine la teneur en cendres en chauffant au rouge un échantillon de poids connu, avec accès d'air de façon à brûler toutes les matières combustibles. Le résidu représente les cendres, qui se composent de matières minérales telles qu'argile, silice, oxydes de calcium et de magnésium, etc. présentes à l'origine dans le bois ou constituant des impuretés apportées par la terre au cours de la carbonisation.

La teneur en cendres du charbon de bois varie entre 0,5% environ 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 et sable. Un charbon de bois en morceaux de bonne qualité aura normalement une teneur en cendres de l'ordre de 3%. Un charbon à l'état de poussier peut avoir une teneur en cendres très élevée, mais si on sépare par criblage les morceaux de plus de 4 mm on pourra trouver une teneur en cendres de 5-10%. Les acheteurs se méfient naturellement du charbon trop fin, qui est difficile à vendre - et aussi à utiliser, malheureusement.

10.1.5 Résultats d'analyses

Pour illustrer le degré de variation de la composition que l'on trouve dans le charbon de bois commercial, le tableau 7 présente des résultats d'analyses d'échantillons aléatoires de charbon provenant de différentes sortes de bois, avec diverses méthodes de carbonisation. En règle générale, tous les bois et tous les systèmes de carbonisation peuvent donner du charbon de bois entrant dans les limites des normes commerciales.

Le tableau 8 montre les variations de composition du charbon de bois entrant dans la charge des hauts-fourneaux d'une grande usine sidérurgique de l'Etat de Minas Gerais au Brésil. Tout le charbon est produit dans des fours en briques en ruche d'abeilles, à partir de bois d'essences mélangées de forêts naturelles de la région ou d'eucalyptus provenant de plantations.

Les chiffres extrêmes et les moyennes annuelles se rapportent à du charbon de bois utilisé par la société Belgo Mineira. Il s'agit d'un mélange comprenant 40% de charbon d'eucalyptus produit dans des fours exploités par la société, et 60% produit à partir de bois d'essences spontanées hétérogènes par des entreprises privées. La mention "bon à excellent" se rapporte au charbon d'eucalyptus produit dans les fours de la société.

Tableau 7 Quelques compositions caractéristiques de charbon de bois

Essence	Méthode de carbonisation	Teneur en humidité %	Cendres %	Matières volatiles %	Carbone pur %	Densité apparente (brut) kg/m^3	Densité apparente (pulvérisé) kg/m^3	Pouvoir calorifique brut kJ/kg (poids anhydre)	Remarques
Dakama (Mora sp.)	Charbonnière en fosse	7.5	1.4	16.9	74.2	314	708	32410	Charbon pulvérisé pour fours rotatifs 1/
Wallaba (Eperua sp.)	"	6.9	1.3	14.7	77.1	261	563	35580	" 1/
Kautaballi (Licania venosa)	"	6.6	3.0	24.8	65.6	290	596	29990	" 1/
Feuillus tropicaux mélangés	"	5.4	8.9	17.1	68.6				Poussier de basse qualité 1/
"	"	5.4	1.2	23.6	69.8				Charbon de bois domestique 1/
Wallaba	Charbonnière en meule	5.9	1.3	8.5	84.2				Echantillon bien carbonisé 1/
"	"	5.8	0.7	46.0	47.6				Echantillon peu carbonisé 1/
Chêne	Four métallique transportable	3.5	2.1	13.3	81.1			32500	2/
Coques de noix de coco	"	4.0	1.5	13.5	83.0			30140	4/
Eucalyptus saligna	Cornue	5.1	2.6	25.8	66.8				3/

1/ Guyane 2/ Grande Bretagne 3/ Brésil 4/ Fidji

Tableau 8. Caractéristiques de charbons de bois destinés à la sidérurgie au Brésil

Composition physique et chimique du charbon (par rapport au poids sec	Extrêmes Max.	Min.	Moyenne annuelle	Charbon de bois considéré comme "bon à excellent"
Carbone	80%	60%	70%	75 - 80 %
Cendres	10%	3%	5%	3 - 4 %
Matières volatiles	26%	15%	25%	20 - 25 %
Densité apparente à la réception (kg/m^3)	330	200	260	250 - 300
Densité apparente (charbon sec)	270	180	235	230 - 270
Taille moyenne (mm) à la réception	60	10	35	20 - 50
Teneur en poussier (- 6,35 mm) à la réception	22%	10%	15%	10 % max.
Teneur en humidité à la réception	25%	5%	10%	10 % max.

10.1.6 Propriétés physiques

Les caractéristiques décrites jusqu'ici se rapportent aux propriétés chimiques, mais les caractéristiques physiques, notamment pour le charbon de bois industriel, ne sont pas moins importantes. C'est surtout dans la sidérurgie au charbon de bois qu'elles ont une grande importance. Le charbon de bois est la plus coûteuse des matières premières qui entrent dans la charge des hauts-fourneaux. Ses propriétés physiques influent le rendement du haut-fourneau, tandis que la composition chimique est plus en relation avec la quantité de charbon nécessaire pour produire une tonne de fer ("mise au mille"), et avec la composition de la fonte ou de l'acier obtenus (1).

Le charbon de bois sidérurgique doit avoir une bonne résistance à la compression pour résister à l'effort d'écrasement dans la charge du haut-fourneau. Cette résistance à la compression, qui est toujours moindre pour le charbon de bois que pour son rival, le coke métallurgique produit à partir de la houille, détermine la hauteur pratique et par suite la capacité de production et le rendement du haut-fourneau. La résistance à la fragmentation au cours des manipulations est importante pour maintenir une perméabilité constante de la charge au "vent chaud", indispensable pour garantir le rendement et la régularité de marche du haut-fourneau.

Différents essais ont été mis au point pour mesurer la résistance à la fragmentation, propriété malaisée à définir de manière objective. Ces essais reposent sur la mesure de la résistance du charbon de bois à la rupture ou à la fragmentation, en laissant tomber un échantillon d'une certaine hauteur sur une plaque métallique, ou en le secouant dans un tambour pour déterminer la diminution de taille des morceaux après un temps donné. Le résultat est exprimé en pourcentage de morceaux passant ou non à travers des tamis de différentes mailles. Un charbon peu résistant à la fragmentation donnera aux essais un plus fort pourcentage de poussier. Celui-ci est indésirable dans les hauts-fourneaux, du fait qu'il contrarie le courant d'air ascendant. Un charbon fragile peut aussi s'écraser sous le poids de la charge, et provoquer des obstructions.

10.1.7 Pouvoir adsorbant

Le charbon de bois est une matière première importante pour la fabrication de charbon activé. Ce produit sort du cadre du présent manuel, mais il peut être utile de donner à son sujet quelques indications, à l'intention des producteurs de charbon de bois qui le vendent à des usines spécialisées pour y être transformé en charbon activé.

Tel qu'il est normalement produit, le charbon de bois n'est pas une matière adsorbante très active vis-à-vis des liquides ou des vapeurs, parce que sa structure fine est obstruée par des résidus goudronneux. Pour le convertir en charbon "actif", il faut ouvrir cette structure en éliminant les goudrons. La méthode la plus employée à l'heure actuelle consiste à chauffer le charbon brut pulvérisé au rouge sombre dans un four, dans une atmosphère de vapeur d'eau surchauffée. Celle-ci empêche le charbon de brûler en excluant l'oxygène. En même temps les goudrons volatils se distillent et sont entraînés par la vapeur, laissant une structure poreuse ouverte. Le charbon traité est transféré dans des récipients étanches, où on le laisse refroidir. Les fours à charbon activé fonctionnent généralement en continu, c'est-à-dire que le charbon pulvérisé tombe en cascade ininterrompue à travers le four dans l'atmosphère de vapeur.

Après activation le charbon est soumis à des tests de qualité pour déterminer son pouvoir de décolorer par adsorption des solutions aqueuses telles que jus de sucre brut, rhum, etc., des huiles végétales, et d'adsorber des solvants tels qu'acétate d'éthyle en vapeur dans l'atmosphère. Le pouvoir adsorbant tend à être spécifique; certaines qualités de charbon activé conviennent pour les solutions aqueuses, d'autres pour les huiles, ou pour les vapeurs. Les tests permettent de mesurer ce pouvoir adsorbant. On constate de légères différences dans le charbon activé produit à partir de charbons bruts de différentes origines, mais en règle générale tous peuvent être utilisés s'ils sont convenablement traités. Un bon charbon de bois pour l'obtention de charbon activé est celui fait à partir d'Eucalyptus grandis dans des fours en briques.

Le charbon activé destiné à l'adsorption des gaz et vapeurs est en général fait à partir de charbon de coques de noix de coco. Ce charbon a un pouvoir adsorbant élevé, et il n'a pas tendance à se pulvériser dans les appareils d'adsorption, ce qui est un facteur très important.

10.2 Efficacité de la combustion

Ayant un charbon de bois de bonne qualité, il faut encore le brûler efficacement pour en obtenir les meilleurs résultats. Cela est particulièrement vrai en usage domestique, où passe la plus grande partie du charbon de bois. Les fours industriels qui brûlent du charbon de bois, tels que hauts-fourneaux, cubilots, fours de frittage, etc. sont en général bien conçus, et fonctionnent efficacement; nous n'en parlerons pas ici. Le principal usage domestique du charbon de bois dans le tiers monde est le chauffage de l'eau, soit pour la cuisson des aliments soit pour avoir de l'eau chaude pour le lavage, etc. Certains aliments sont cuits par chauffage direct et non bouillis dans l'eau, tels que maïs grillé, viande rôtie, etc. Un système de cuisson aurait un rendement de 100% si toute la chaleur produite par la combustion était absorbée par l'aliment à cuire. En pratique c'est loin d'être le cas. Un rendement normal pour un appareil de cuisson bien conçu et bien utilisé serait de l'ordre de 30%, c'est-à-dire que 70% de la chaleur s'échappe en pure perte. Dans un climat froid, une partie de cette chaleur perdue peut être récupérée pour chauffer l'air de la pièce, remplissant ainsi une fonction utile qui accroît l'efficacité globale.

En théorie, il est possible d'améliorer le rendement du transfert de chaleur du charbon de bois en combustion aux aliments à cuire, en accroissant le coût et la complexité de l'appareil de cuisson, mais c'est rarement réalisable en pratique. Ceux qui pourraient se le permettre ne brûlent généralement pas du charbon de bois, mais utilisent des combustibles plus commodes d'emploi, ou socialement plus prestigieux. Il faut réaliser un compromis qui procure le meilleur rendement possible, compatible avec un matériel de cuisson suffisamment simple et bon marché pour pouvoir être utilisé par la masse des usagers. Le charbon de bois, à la différence du bois, transmet une bonne part de sa chaleur de combustion au récipient de cuisson par radiation des braises incandescentes. Un feu de bois, dans lequel les gaz chauds sont produits par de longues flammes paresseuses, doit transmettre une grande partie de sa chaleur par convection. Pour cela, les gaz chauds doivent être en contact direct avec la marmite, tandis que la chaleur radiante est transmise par les radiations infrarouges émises directement par le foyer et absorbées par la surface de la marmite ou autre ustensile. La marmite doit par conséquent être en "vue directe" du foyer pour pouvoir recevoir et absorber l'énergie calorifique radiante. Sa surface joue un rôle important; elle doit de préférence être noir mat. La marmite elle-même doit également être bonne conductrice de la chaleur.

L'aluminium mince, noirci par le feu est probablement l'idéal, la terre cuite épaisse, de faible densité, le moins bon. Une marmite noirci par le feu ne doit pas être polie extérieurement; on doit seulement enlever les couches de suie peu adhérente et de goudron pâteux qui se déposent à sa surface.

10.2.1 Comment le charbon de bois brûle

Le charbon de bois réagit avec l'oxygène de l'air à la température du rouge incandescent pour former du monoxyde de carbone incolore, qui brûle alors avec une flamme bleue en se combinant avec une quantité supplémentaire d'oxygène de l'air pour former du dioxyde de carbone ou gaz carbonique. Par suite de la chaleur libérée par ces deux réactions, le charbon devient rouge incandescent et rayonne de l'énergie thermique, et le gaz chaud de dioxyde de carbone sort de la zone de combustion, en cédant par convection une partie, que l'on souhaite la plus grande possible, de sa chaleur par contact direct avec le récipient de cuisson. La température des gaz s'abaisse lors de ce transfert de chaleur, et ils se dissipent dans la pièce. On n'emploie généralement pas de cheminée avec le charbon de bois, du fait que sa combustion est relativement inodore et sans fumée par comparaison avec le bois ou avec le charbon minéral. Le charbon de bois en brûlant peut dégager du monoxyde de carbone non brûlé; c'est un gaz très toxique, et il est indispensable de ventiler les pièces dans lesquelles on brûle du charbon de bois.

Le fait que le charbon de bois peut être brûlé dans un fourneau portable compact, n'exigeant pas de cheminée, est l'un de ses prinicpaux atouts, et explique sa popularité universelle, notamment dans les zones urbaines. Bien qu'il soit préférable pour un pays, d'un point de vue de rendement énergétique global, de chercher à utiliser de la façon la plus efficace possible du bois pour la cuisson des aliments plutôt que de le convertir auparavant en charbon, c'est une politique qui est difficile à appliquer. Pour la plupart des gens qui utilisent à l'heure actuelle du charbon de bois, il est difficile de se convertir au bois. Un fourneau à bois avec une cheminée coûte cher; le corps du fourneau peut être fait en terre glaise et ne rien coûter, mais un tuyau de cheminée en métal peut coûter 10 dollars ou plus. Pour des gens qui vivent à l'étroit dans des immeubles urbains, l'installation de cheminées peut être impossible, et l'absence de pollution du charbon de bois l'impose dans ce cas comme combustible.

Les caractéristiques importantes que l'on note sur les appareils de combustion à charbon de bois domestiques bien conçus et efficaces peuvent être résumées comme suit:

(i) Le charbon de bois doit être en "vue directe" du récipient qu'il chauffe, et en être le plus près possible. Les parois du foyer ne doivent pas être au contact direct du charbon enflammé. Cela suppose un espace de combustion plus ou moins en forme de cône inversé faisant un angle intérieur de 80-90°, le foyer étant situé au sommet du cône.

(ii) Le corps du fourneau doit être fait en matériel réfractaire, non métallique, insensible à des températures de l'ordre de 1000°C, et constituer un bon isolant thermique afin de ne pas dissiper la chaleur du foyer. Un bon matériel est une terre cuite poreuse blanche, de façon à mieux réfléchir la chaleur sur la marmite. Le corps du fourneau doit pouvoir être remplacé sur son bâti, de façon à diminuer les coûts d'entretien. Un corps de fourneau moins coûteux et plus ou moins satisfaisant peut être confectionné en tassant dans un moule en bois un mélange plastique composé de 60% d'argile, 20% de sable et 20% de poussier de charbon de bois, et en le laissant sécher; bien que moins durable que la terre cuite, il est peu coûteux.

(iii) Le foyer conique doit comporter sur sa surface quatre rainures d'environ 30 mm de large et 4 mm de profondeur, qui servent de conduits pour permettre aux gaz chauds de s'échapper même au cas où la marmite s'ajusterait hermétiquement sur le cône.

(iv) La grille doit être en tôle d'acier, avec des trous de clou de 3 mm espacés de 1x1 cm environ.

(v) Le bâti du fourneau, qui peut être fait avec de la tôle de récupération, doit avoir des pieds qui laissent un espace de 4-5 cm entre le fond du corps en terre et le sol. Un bac en tôle de récupération est placé en dessous pour recevoir les cendres chaudes, de sorte que le fourneau puisse être posé sur n'importe quelle surface sans créer de risque d'incendie.

Le modèle illustré fig.12 n'est qu'un exemple parmi beaucoup d'autres, mais tous les bons modèles de fourneaux à charbon de bois respectent les principes énumérés ci-dessus. Il est bon de souligner que l'objectif à rechercher est un maximum d'efficacité pour un coût minimum, sinon l'appareil ne sera pas utilisé.

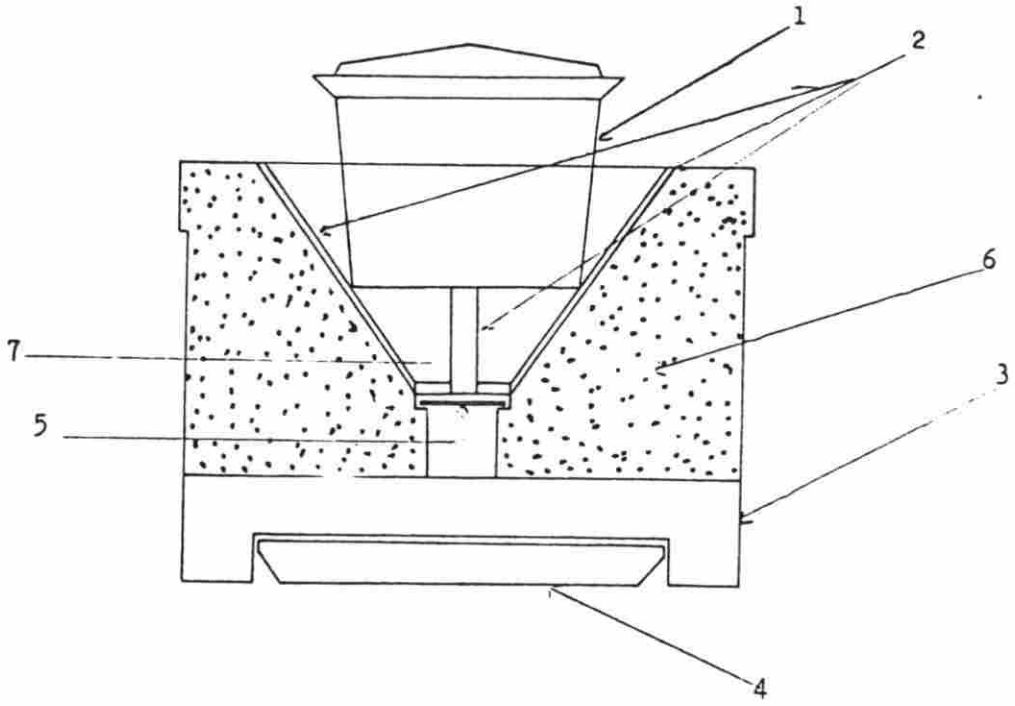


Fig. 12 Réchaud à charbon de bois bien conçu

1. Marmite ronde
2. Conduits de sortie des gaz brûlés dans le corps du réchaud
3. Enveloppe extérieure en tôle de récupération
4. Bac à cendres en tôle de récupération
5. Grille perforée en tôle de récupération
6. Corps en terre cuite blanche ou mélange argile - sable - poussier
7. Charbon enflammé

Chapitre 13

RESULTATS COMPARATIFS DES DIFFERENTS SYSTEMES DE CARBONISATION

A travers le monde la conversion du bois en charbon de bois se fait par une étonnante diversité de systèmes. Pour tout projet de production de charbon de bois, il importe de choisir la méthode de carbonisation optimale. Un examen attentif révèle les raisons pour lesquelles un si grand nombre de méthodes peuvent coexister, différentes dans le détail, mais reposant toutes sur le même principe fondamental.

La plus grande partie du charbon de bois est produite par de petits charbonniers locaux, pour leurs propres besoins ou pour une commercialisation à petite échelle. Il y a relativement peu de commerce international de charbon de bois, et il n'existe guère de concurrence entre les producteurs de différentes régions. Ce fait tend à isoler les producteurs de charbon de bois des divers pays, et favorise le maintien de différences régionales marquées.

La raison qui motive la carbonisation du bois est encore un autre facteur. Il y a d'une part les gens qui font du charbon de bois pour l'industrie, et recherchent un maximum d'efficacité et de rentabilité, et à l'autre bout de l'échelle ceux qui carbonisent le bois simplement parce qu'ils n'ont pas d'autre méthode pour fractionner le bois en grumes afin de pouvoir l'utiliser comme combustible pour la cuisine. Les uns et les autres ont des orientations totalement différentes. Le premier groupe a accès au financement et à la technologie, tandis que les seconds peuvent ne pas même posséder une hache ou une scie convenable, et doivent choisir une méthode qui exige un minimum d'investissement en argent. Si cela entraîne un gaspillage de ressources ou d'énergie humaine, il semble ne pas y avoir pour eux d'autre choix.

La tradition, qui incarne la sagesse des sociétés rurales, joue un rôle important. Utiliser la méthode bien établie, dont on sait qu'elle fonctionne avec succès dans une localité, est le choix logique pour ceux qui ne peuvent se permettre de prendre de risque en raison de leur situation économique précaire. Là où les facteurs sociaux sont prédominants, il est généralement très difficile d'introduire de nouvelles techniques de carbonisation, à moins de modifier les facteurs sociaux. On assiste souvent à des tentatives visant à modifier les techniques de carbonisation en apportant une aide matérielle telle que scies à chaîne, nouveaux fours, etc. Lorsqu'ils ne disposent plus de cet équipement, la nécessité économique oblige les producteurs à revenir à leur méthode traditionnelle, avec tous les défauts techniques évidents qu'elle comporte. C'est pourquoi les méthodes de carbonisation ne peuvent pas être évaluées uniquement en fonction de critères techniques: les facteurs sociaux sont tout aussi importants.

Mais, à long terme, il importe d'avoir une bonne technologie pour pouvoir améliorer les conditions sociales. C'est pourquoi, si les facteurs sociaux le permettent, il faut employer des méthodes qui donnent des rendements plus élevés de charbon de bois de meilleure qualité, et à plus bas prix. Ces considérations techniques font l'objet du présent chapitre, qui se propose de comparer les différentes méthodes de carbonisation du bois.

13.1 Indices de performance des équipements de carbonisation

La figure 13 présente une classification des méthodes de carbonisation, établie sur la base de la référence 29, qui présente un utile tableau d'ensemble de la gamme de méthodes existantes.

La première différence importante se situe entre des systèmes dans lesquels le bois est chauffé par des moyens extérieurs, utilisant le bois, le mazout, le gaz, etc., et des systèmes qui permettent une combustion partielle de la charge de bois à l'intérieur du four ou de la charbonnière, et utilisent la chaleur produite pour sécher et carboniser le reste.

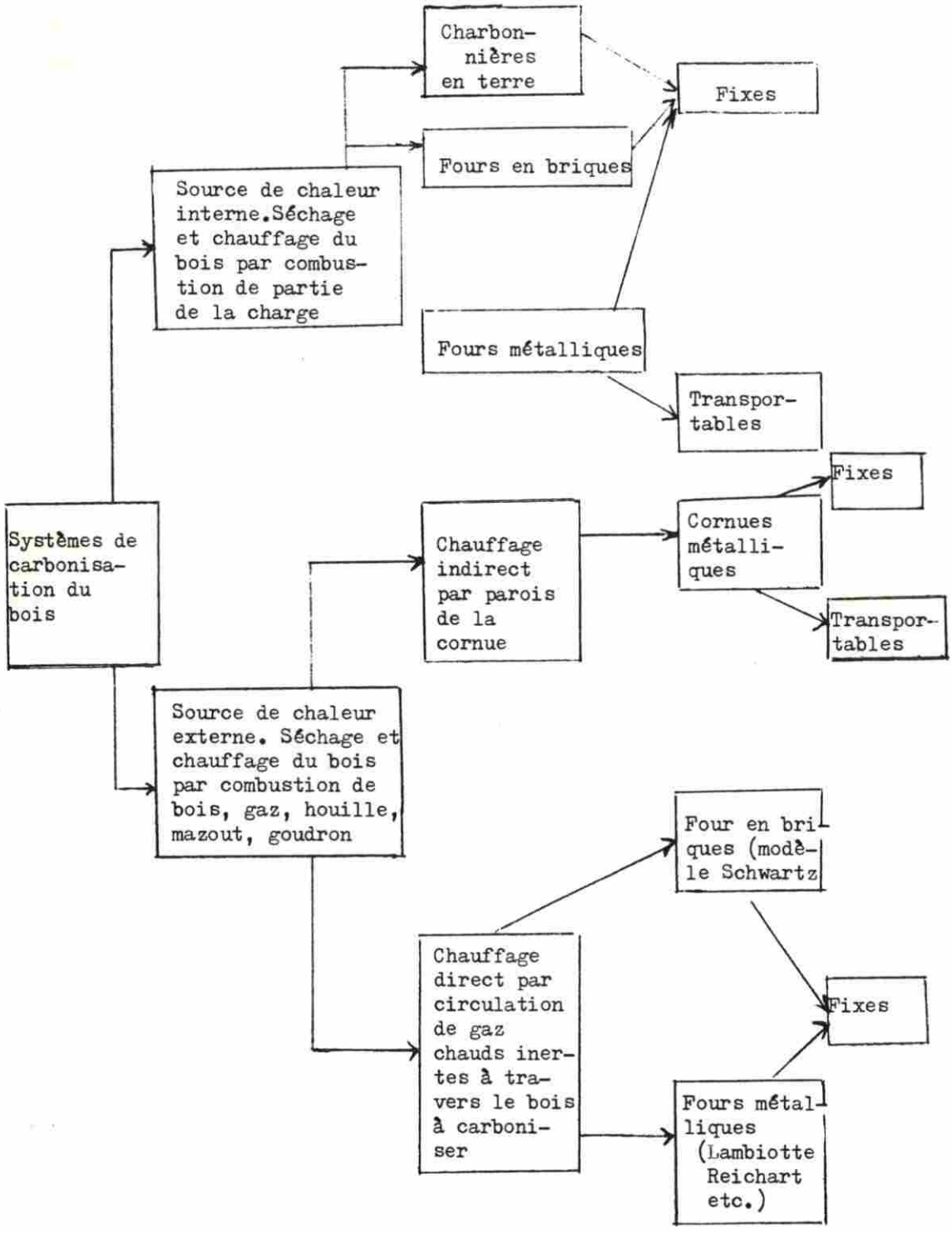


Fig. 13 Classification des systèmes de carbonisation

Cette dernière méthode devrait être la plus efficace, étant donné que la chaleur est produite là où elle est nécessaire, à partir de bois de feu peu coûteux. En pratique,il est difficile de contrôler la combustion, et une certaine quantité de bois est brûlée en trop, ce qui diminue le rendement.

Le chauffage indirect, c'est-à-dire externe, permet un contrôle plus précis, mais la transmission de la chaleur à la charge est malaisée et peu efficace, et les cornues métalliques sont presque indispensables dans ce cas. Les sous-produits peuvent être récupérés exempts de contamination par les produits de la combustion. Une méthode hybride consiste à chauffer la charge de bois en la faisant traverser par un courant de gaz chauds, obtenus par combustion de bois, de mazout ou de gaz. Un contrôle précis est nécessaire pour s'assurer que les gaz chauds ne contiennent pas d'oxygène, sinon une partie du bois sera brûlée au lieu d'être simplement carbonisée. Le transfert de chaleur des gaz chauds au bois est très efficace, et lorsqu'on fait recirculer les gaz avec un contrôle approprié, il est possible de condenser et recueillir les sous-produits et récupérer le gaz de bois combustible.

Les systèmes faisant appel à une production interne de chaleur peuvent encore être subdivisés selon leur mode de construction. Il y en a trois possibles: la terre, qui est la moins coûteuse, les briques ou la maçonnerie, d'un coût intermédiaire, et la tôle d'acier qui est la plus chère. Les fours métalliques se divisent à leur tour en fours transportables et en fours fixes.

Les fours métalliques présentent deux avantages: ils peuvent être déplacés aisément, ce qui peut être très utile, et ils se refroidissent rapidement, ce qui permet un cycle de carbonisation plus court. La mobilité, toutefois, n'est pas toujours une bonne chose, car elle rend l'organisation et la surveillance des opérations plus difficile, et d'autre part les fours en briques peuvent être refroidis assez rapidement en utilisant de la boue argileuse liquide ou - avec prudence - de l'eau en injection dans le four. La durée du cycle sera encore de six à huit jours, au lieu de deux jours pour les fours métalliques, mais le plus grand volume et le coût moindre des fours en briques les rendent préférables sauf dans le cas où la mobilité est indispensable.

Les charbonnières en meule ou en fosse, même lorsqu'elle sont conduites avec efficacité, brûlent et se refroidissent lentement, et leur charbon est plus ou moins mélangé de terre. Cependant, là où les disponibilités financières sont limitées ou nulles, elles présentent de réels avantages.

Les fours à source de chaleur externe se subdivisent en deux: ceux qui sont chauffés par des gaz chauds passant à travers la charge, et ceux dans lesquels la chaleur est transmise à travers les parois. La plupart de ces derniers sont métalliques, mais il y a une exception, le four Schwartz, encore utilisé aujourd'hui, qui est en briques, et dans lequel la charge est chauffée par un courant de gaz chauds provenant d'un foyer construit sur le côté du four et brûlant du bois de basse qualité et de l'écorce. Théoriquement excellent du fait qu'il permet de brûler des combustibles de faible valeur, ce four est en pratique désavantagé par comparaison avec les fours en briques à combustion interne du fait du coût élevé de sa construction comportant des éléments en acier et en fonte, et de la difficulté de contrôler le feu avec précision et de fermer hermétiquement le four pour le refroidissement, d'où entrées d'air et pertes de charbon.

Les cornues en métal, chauffées à travers les parois, ne sont plus très employées aujourd'hui en raison de leur coût élevé et de leur faible rendement intrinsèque, mais on a vu apparaître récemment des cornues expérimentales transportables et semi-transportables (14), telles que la cornue Constantine et la cornue jamaïcaine, faite avec des fûts de carburant. Les fours-cornues chauffés par circulation de gaz chauds sont efficaces, produisent un charbon d'excellente qualité, et permettent la récupération des sous-produits. Cependant leur coût initial élevé leur enlève de l'intérêt, sauf là où les coûts de main-d'oeuvre des systèmes traditionnels sont encore plus élevés. Ils sont surtout employés à l'heure actuelle pour fabriquer du charbon de bois de haute qualité à usage métallurgique et chimique. Leur emploi dans l'industrie du charbon de bois a pu paraître intéressant autrefois, mais les progrès récents dans la fabrication de fer de haute pureté sans charbon de bois, et les changements dans l'industrie mondiale de l'acier basée sur la houille le rend problématique aujourd'hui, tant que l'on n'en aura pas mis au point des versions moins coûteuses. Il semble peu probable qu'ils puissent jouer un grand rôle dans la production de charbon de bois à usage domestique dans les pays en développement.

Ayant ainsi classifié les divers types de fours et charbonnières, on peut les comparer entre eux au moyen de différents indices calculés (29), tels que production par unité de volume intérieur, surface unitaire occupée, unité de capital investi, etc. Ces calculs seront surtout utiles pour comparer des fours de même catégorie, une fois que le type général

d'installation aura été choisi en fonction de grands critères sociaux et techniques. En pratique, en ce qui concerne les pays en développement, le choix se limite aux charbonnières en fosse ou en meule, aux fours en briques et aux fours métalliques, tous à chauffage interne. Lorsque les ressources financières sont un facteur limitant et que le bois est disponible, les charbonnières en terre sont préférables. Lorsqu'on dispose de capital et qu'il faut un effort sérieux pour produire avec un bon rendement un charbon de qualité, les fours en briques auront sans doute la préférence. Les fours métalliques, enfin, pourront avoir leur place là, où la mobilité a une telle importance qu'elle prend le pas sur les coûts élevés d'investissement et d'entretien.

13.2 Influence des caractéristiques du bois sur les méthodes de carbonisation

Les caractéristiques de la matière première ont une incidence importante 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.

13.2.1 Essence

En règle générale toutes les essences de bois peuvent être carbonisées pour produire un charbon utilisable. La teneur en cendres des différents bois peut varier, mais cette variation est généralement peu importante. L'écorce, en revanche, a une teneur en cendres excessive, et donne un charbon trop friable pour la plupart des usages. C'est pourquoi, chaque fois que possible, l'ecorce ne doit pas être utilisée, ou bien sa proportion dans la charge de bois doit être réduite au minimum.

Les bois résineux donnent en règle générale un charbon plus tendre et plus friable que les feuillus, mais quand ils sont disponibles en quantité à un prix convenable, ils constituent une bonne matière première pour produire tous les types de charbon de bois.

Lorsqu'on peut choisir son approvisionnement en bois, par exemple lorsqu'on crée des plantations forestières pour l'assurer, il vaut la peine de choisir l'essence et de conduire les peuplements de manière à obtenir un charbon de propriétés optimales. Les eucalyptus donnent un charbon dense, de bonne qualité, et sont les essences de reboisement les plus appréciées dans ce but. Des essences peu connues et n'ayant pas encore fait leurs preuves doivent faire l'objet d'essais préalables sérieux.

Ce qui compte en définitive, c'est la masse de charbon de bois marchand produite par unité de masse de matière ligneuse. Le volume de bois produit à l'hectare ne donne qu'une indication approchée de la masse de matière ligneuse produite. Un fort accroissement en volume peut correspondre à une faible densité, et par conséquent à un faible rendement en charbon par unité de volume de bois. Un bois plus dense, par ailleurs, fournit généralement un charbon plus dense, moins friable. C'est pourquoi il est intéressant de rechercher les essences de reboisement et les modes de traitement qui procurent un rendement maximum de bois en poids. D'actives recherches sont menées dans ce domaine, et on ne dispose pas encore de réponses précises, mais les eucalyptus restent le genre botanique le plus en faveur.

13.2.2 Teneur en humidité

L'humidité contenue dans la charge de 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, par ailleurs, est supérieur à celui du bois sec, et le coefficient de remplissage diminue par conséquent lorsqu'on emploie du bois vert. Le bois sèche à l'air en épargnant les coûts de chauffage; le coût du séchage à l'air est surtout un coût financier, auquel s'ajoutent les pertes dues à l'altération par les champignons et aux attaques d'insectes. Il faut trouver le compromis optimal dans le temps de séchage, afin d'avoir une perte d'humidité maxima au début lorsqu'elle est rapide; les frais financiers sont moindres et les pertes dues aux insectes et aux champignons sont encore peu importantes. Un temps de séchage de trois mois est en gros l'optimum, mais celui-ci varie selon le climat et le type de bois. Un séchage efficace est difficile à réaliser en zone tropicale humide.

13.2.3 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. La sciure de bois, par exemple, peut être carbonisé très

rapidement, mais le charbon pulvérulent obtenu n'a qu'une valeur marchande faible. D'une autre côté, les troncs de gros diamètre d'essences denses peuvent éclater à la carbonisation, en donnant un charbon plus friable. Des études ont montré qu'on obtenait un charbon de propriétés optimales pour la sidérurgie avec des bois de 2,5 à 8 cm de section transversale. La longueur dans le sens du fil a peu d'influence (26).

Avec des bois provenant de peuplements artificiels, il est possible d'avoir des morceaux de dimensions uniformes, tandis qu'en forêt naturelle on aura des bois de tailles très variées. Le tronçonnage et le fendage coûtent cher en main-d'oeuvre, en carburant et en capital, et doivent être évités dans la mesure du possible. Pour carboniser des troncs de gros diamètre et des charges de bois de tailles mélangées, un cycle lent est préférable. La carbonisation en fosse est l'optimum. Parmi les fours en maçonnerie ceux de plus grande taille, à cycle lent, sont les meilleurs. C'est une méthode éprouvée de carbonisation pour les bois denses de gros diamètre (de l'ordre de 50 cm) provenant de forêts naturelles. On peut éviter les difficultés de carbonisation en plaçant les plus gros morceaux au centre de la charge. Les fours métalliques qui perdent beaucoup de chaleur à travers les parois et se refroidissent rapidement sont peu efficaces pour carboniser des bois de large section.

Le coût du débitage des bois est important, et il s'accroît avec la hausse des coûts de carburant et de main-d'oeuvre et des frais financiers, et cela favorise l'emploi de charbonnières en fosse ou en meule et de fours en briques. Il est par ailleurs en général plus facile et plus rapide de charger avec des bois de grandes dimensions, surtout si leur longueur est en accord avec la taille du four ou de la charbonnière. Il est recommandable d'étudier attentivement la relation entre croissance, récolte, séchage et charge de carbonisation pour déterminer les dimensions optimales des bois, tant en longueur qu'en diamètre, de façon à réduire au minimum les frais de manipulation et de carbonisation, et obtenir un charbon de propriétés optimales pour l'usage auquel il est destiné.

Les ruraux pauvres qui ne peuvent se payer des scies et des haches convertissent souvent les bois de gros diamètre en charbon, qu'ils peuvent ensuite fragmenter pour l'utiliser dans les foyers de cuisine. Si l'on compare l'efficacité relative de la conversion de bois en charbon de bois, et de la combustion du bois et du charbon dans un foyer de cuisine, cette pratique ne manque pas de justifications. En outre, le charbon est sec, et peut se conserver indéfiniment sans se détériorer. Les calculs montrent que la carbonisation des bois de gros diamètre et la combustion du charbon obtenu représentent un rendement thermique environ double de celui de la combustion directe du bois dans un foyer ouvert. Ce qui plus est, sans haches, scies et coins, les bois de gros diamètre sont inutilisés, et risquent fort de pourrir avant de pouvoir être brûlés.

Chapitre 14

ECONOMIE DE LA CARBONISATION ET CONTROLE DES COUTS

On peut diviser les producteurs de charbon de bois en deux groupes. Le premier comprend tous les petits charbonniers au niveau de subsistance qui ne vendent leur charbon que pour se procurer l'argent nécessaire pour acheter de la nourriture, payer leurs impôts, etc. Economie et contrôle des coûts n'ont que peu d'intérêt pour eux; ils ont besoin d'argent liquide, et la vente d'une partie de leur charbon est un moyen d'en acquérir.

Pour le second groupe, la production et la vente du charbon de bois constituent une entreprise dans laquelle la circulation et l'accroissement du capital investi sont la préoccupation essentielle. L'économie de la production et le contrôle des prix de revient sont importants pour ce groupe.

Bien que les producteurs du premier groupe ne se préoccupent guère eux-mêmes de l'aspect économique, les autorités publiques qui cherchent à améliorer l'industrie du charbon de bois doivent procéder à une étude économique de cette production artisanale. L'analyse économique doit être à la base de tout programme d'assistance à ces petits producteurs, qui dans de nombreux pays représentent la plus grande part de la production totale de charbon de bois. Elle permettra de définir l'avenir de ce secteur, de révéler ses aspects positifs et négatifs, et d'évaluer sa viabilité à long terme.

14.1 Analyse économique et contrôle des coûts

Il est difficile de tracer une ligne de séparation nette entre ces deux activités. En règle générale, l'analyse économique intervient directement dans la phase de planification du développement de l'entreprise, pour en projeter la construction et la mettre en état de produire. Son objectif est de démontrer la viabilité économique de la proposition, et ensuite mobiliser les fonds d'investissement nécessaires et indiquer comment ils seront gérés et remboursés. Le contrôle des coûts, quant à lui, s'intéresse davantage à une entreprise qui est déjà sur pied et en fonctionnement. C'est l'outil de gestion qui permet à l'entreprise de rester économiquement viable.

Le contrôle des coûts de production est bâti autour des opérations de l'entreprise, dont il forme une part. Il ne nécessite qu'une compétence en matière d'expertise comptable, ou même de simple comptabilité courante. Il requiert essentiellement l'utilisation de données et de statistiques qui sont recueillies dans l'entreprise elle-même. L'analyse économique exige en revanche des connaissances plus approfondies en économie, et une connaissance technique des opérations envisagées. Un grand projet demande une équipe de techniciens, les uns plus qualifiés en économie, les autres en technologie et ingénierie.

14.2 Méthodes d'analyse économique des projets

Le processus d'analyse économique des projets est souvent appelé étude de faisabilité, mais celle-ci, strictement parlant, n'est qu'une étape dans l'élaboration d'un projet complet. Pour les projets de production de charbon de bois de grande et moyenne taille (3, 22), il faut une équipe d'experts couvrant les domaines de l'économie, de la forêt, du bâtiment et du génie civil, de la technologie de la production envisagée, des finances et de la commercialisation. Une étude complète d'industrie du charbon de bois aura les objectifs suivants:

1. S'assurer qu'il existe un marché ou une utilisation de dimension suffisante pour le charbon de bois et pour les sous-produits, et les chiffrer en détail.
2. Vérifier qu'il existe des ressources suffisantes en matière première convenable, et qu'elles peuvent être exploitées économiquement pendant la durée de vie prévue de l'usine, ou qu'on peut les créer économiquement par des plantations forestières.

3. Choisir les techniques de production à employer, et projeter la chaîne entière de production depuis la récolte des bois jusqu'à l'emballage et à la commercialisation du charbon de bois.

4. Etablir des projections financières complètes montrant le mode de financement, des budgets de dépenses détaillés pour la préparation du terrain, les infrastructures, la construction et le démarrage des installations, la formation du personnel. Ces projections financières doivent porter sur une durée d'une vingtaine d'années environ, jusqu'au point où les dettes engagées dans la construction de l'usine auront été liquidées, et où l'entreprise sera une affaire bien établie. Pour une simple entreprise de fabrication de charbon de bois une projection de 12 à 15 ans peut être suffisante, mais si l'entreprise doit créer des reboisements pour assurer son approvisionnement en bois, il faut étendre la projection financière à la durée d'une révolution complète, jusqu'au moment où il faut replanter, ce qui peut représenter 20 ans ou plus. Les projections financières seront sous la forme d'un modèle financier montrant les bénéfices et les pertes, l'origine des fonds, les dépenses, les charges fiscales, la marge brute d'autofinancement.

5. Préparer des dossiers en vue de négociations avec les administrations publiques sur les questions de ressources forestières, implantation des installations, disponibilités en énergie et en eau, dégrèvements fiscaux, besoins d'infrastructures, lutte contre la pollution, etc.

6. Préparer des dossiers et négocier avec les bailleurs de fonds, nationaux et internationaux, pour assurer le financement du projet.

La liste des éléments à rassembler et des tâches à accomplir sont impressionnantes et représentent une grande dépense de temps et d'argent. Fort heureusement, des procédures plus ou moins normalisées ont été établies par les organismes de financement internationaux; elles comportent un certain nombre d'étapes qui ont pour objet de tester la viabilité d'un projet avant d'engager des fonds pour une étude technique et financière complète. Normalement l'étude de projet définitif est précédée d'au moins deux étapes, nommées étude de préfaisabilité et étude de faisabilité. Si les résultats de ces études sont positifs, on pourra engager des fonds dans l'élaboration d'un projet complet,aboutissant au financement et à la construction de l'entreprise.

La valeur de l'étude complète dépend en définitive de la qualité des données de base sur lesquelles elle est fondée. Une étude qui s'appuie sur des prémisses fausses est sans utilité. Seule l'expérience de terrain peut indiquer si les données de base sont acceptables ou non. Pour avoir une idée de l'influence d'erreurs dans les hypothèses de base, il est d'usage de tester le modèle financier complet du projet, en prenant différentes valeurs des données essentielles telles que prix de vente du charbon de bois, pourcentage de poussier, rendement en charbon de la carbonisation, coût du bois livré au four, coût de production et de récolte des bois, rapidité de croissance des plantations, etc. Le degré de risque entraîné par des variations dans les principaux facteurs de coût apparaît alors plus clairement, et on peut alors examiner de plus près ceux qui sont les plus déterminants. Une fois que le modèle financier a été élaboré et programmé sur ordinateur, une telle étude est relativement simple à effectuer. La planification est relativement simple; la tâche la plus difficile, surtout avec les taux d'intérêt élevés actuels, est de construire l'usine et de la faire fonctionner de manière rentable avec les ressources financières disponibles. S'il y a d'importants dépassements de devis ou retards de construction, on peut facilement se trouver dans une situation dans laquelle le projet ne peut être achevé, ou ne peut fonctionner de manière rentable. D'où la nécessité de rechercher des solutions qui permettent de faire du charbon de bois avec un minimum d'investissement de capital.

14.3 Contrôle des coûts des entreprises existantes

Trouver le financement nécessaire et construire une grande entreprise nouvelle de carbonisation est aujourd'hui une affaire difficile et coûteuse. Comme nous l'avons dit plus haut, les frais de premier établissement et les charges d'intérêts sont si élevés que quelques retards dans la construction peuvent transformer un projet rentable en une source de déficit permanent. C'est pourquoi il faut accorder plus d'attention à l'amélioration et au développement des entreprises de carbonisation existantes, en se fondant sur la compétence et les ressources propres qu'elles possèdent, et en s'attachant à résoudre les contraintes qui les empêchent de fonctionner avec une efficacité maxima. Il est en général plus facile, et souvent financièrement plus profitable, de développer une entreprise existante plutôt que d'en bâtir une nouvelle de grande taille en espérant la faire fonctionner fructueusement sans difficultés.

Les entreprises établies et les systèmes de production traditionnels ne sont pas toujours prospères ni fondés sur des bases saines. Néanmoins, on trouve dans tout système un fond de savoir-faire et d'expérience qui peut souvent être mobilisé et amené à travailler plus efficacement grâce à un contrôle approprié des coûts.

14.3.1 Opérations élémentaires

La première étape dans le contrôle des coûts consiste à définir les opérations élémentaires et à établir une liste de postes de dépense, qui coïncideront en général avec ces opérations élémentaires. L'exemple qui suit est emprunté à des opérations de carbonisation dans les forêts du Chaco, en Amérique du Sud (3), où l'on trouve une production de charbon de bois à grande échelle, par des méthodes traditionnelles mais bien organisées. Les opérations élémentaires sont indiquées sur la figure 14. On peut les prendre comme postes de dépense, et calculer les coûts unitaires pour chacune d'elles. Le coût de production total étant la somme des coûts unitaires, à condition qu'ils soient exprimés dans une unité de mesure commune, par exemple par tonne de charbon de bois à la sortie du four, l'importance relative de chaque opération élémentaire apparaît clairement. Par exemple, le coût unitaire de la coupe et du débardage des bois en bord de route peut être mettons de 5 $ par stère. Il faut l'exprimer en dollars par tonne de charbon de bois à la sortie du four pour que sa contribution au coût total apparaisse. Ce coût dépend du rendement des étapes suivantes du processus de production. Le seul élément d'importance, en général, est la perte au cours de la carbonisation. Le coût de 5 $ par stère doit être multiplié par le nombre de stères nécessaire pour produire une tonne de charbon de bois. Un chiffre moyen peut être de 7,3 stères de bois par tonne de charbon exempt de poussier. Le coût du bois sur bord de route sera alors : 5 x 7,3 = 36,50 $ par tonne de charbon de bois marchand à la sortie du four. Le même calcul devra être appliqué à tous les coûts unitaires, pour déterminer leur influence globale sur le prix de revient du produit.

Cela exige une connaissance technique du processus de production aussi bien qu'une compétence en matière de comptabilité analytique, de même que pour décider s'il y a lieu de chercher à réduire l'influence de telle ou telle opération élémentaire sur les coûts. On pourrait par exemple accroître le rendement en bois à l'hectare en récoltant davantage de bois de branches de petit diamètre. Mais si ce bois ne donne dans le four que du charbon trop fin, le résultat de ces efforts pourra être négatif. Pour éclaircir ce point, il faudra procéder à des essais. Il est par conséquent nécessaire de conjuguer les efforts du technicien et de l'économiste pour parvenir à un contrôle des coûts efficace.

14.3.2 Coûts unitaires et établissement d'un budget

Il faut fixer des objectifs pour les coûts unitaires lors de l'établissement du budget analytique. Il est plus commode d'évaluer ces coûts pour chaque secteur dans l'unité de mesure usitée à ce point, par exemple stère de bois, tonne de charbon, tonne x kilomètre pour le transport du charbon, etc. La gestion de l'entreprise utilise ces chiffres en leur appliquant des coefficients de conversion appropriés et en les combinant de façon à vérifier les résultats globaux du point de vue du budget général de l'entreprise. Pour mesurer les résultats de l'entreprise il faut procéder à des inventaires périodiques, tous les un à trois mois. Les stocks de matière première, de charbon de bois semi-fini et fini, combinés avec les entrées de bois et les expéditions de charbon de bois au cours de la période d'inventaire, permettant de calculer les résultats d'ensemble. En outre, il faut tenir dans chaque service une comptabilité des matières utilisées, de la production obtenue, du nombre de fournées réalisé. Les événements exceptionnels tels qu'inondations, périodes de pluies prolongées, forte sécheresse, pénurie de main-d'oeuvre, pannes de l'équipement,

retards de transport, doivent également être notés dans les registres de production de chaque service. Il faut évidemment avoir les instruments de mesure et de pesage nécessaires.

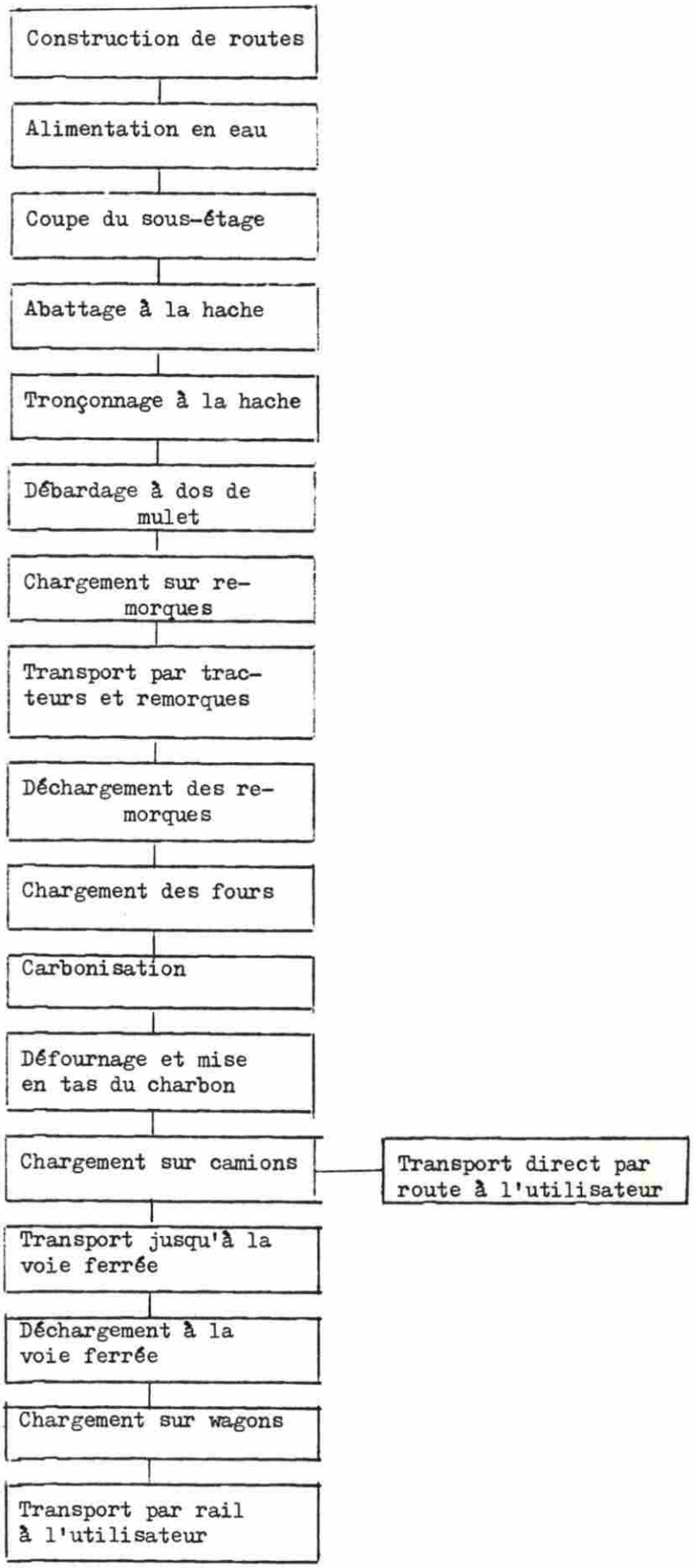
14.3.3 Frais généraux de surveillance et de direction

N'importe quel système de contrôle de gestion et de budget analytique exige du personnel et coûte de l'argent. Il faut que l'effort consenti en vaille la peine. C'est pourquoi les coûts de direction doivent être calculés et ventilés par secteurs. L'analyse des coûts pour chaque opération élémentaire pourra révéler que certaines opérations devraient de préférence être effectuées en sous-traitance, ce qui normalement demande moins de surveillance et de frais généraux. Dans le cas particulier du transport, une entreprise spécialisée sera souvent moins chère qu'un service de transport interne.

Le rassemblement et l'évaluation des données de contrôle des coûts exigent normalement un technicien supplémentaire, qui pourra être chargé également du contrôle de qualité, etc. Le traitement des données brutes à l'intention de la gestion est ensuite généralement effectué par le personnel administratif de l'entreprise.

Les coûts unitaires calculés pour chaque opération élémentaire sont alors comparés par le responsable de la gestion avec les prévisions budgétaires établies au début de l'exercice. Des mesures peuvent être prises pour réduire les dépassements lorsqu'ils se produisent, et en même temps la situation financière de l'entreprise est révélée au moins mois par mois. Les profits et pertes de l'entreprise ne seront pas connus au centime près par ce procédé; les résultats financiers exacts sont fournis par la comptabilité financière normale, tenue parallèlement à la comptabilité analytique. Les comptes financiers, toutefois, ne donnent qu'une vue historique des résultats, qui risquent d'être connus trop tard pour permettre de prendre les mesures correctives nécessaires.

Fig. 14 Opérations élémentaires dans la production de charbon de bois



Annexe 2

CONSTRUCTION D'UN FOUR METALLIQUE MODELE T.P.I.*

1. Description

Le four se compose de deux sections cylindriques (1,2) s'emboîtant l'une sur l'autre, et d'un couvercle conique (3). Le couvercle comporte quatre orifices de sortie de vapeur (4) disposés symétriquement, pouvant être bouchés par des tapes (5) lorsque c'est nécessaire. Le four repose sur huit conduits d'entrée d'air et de sortie de gaz (6), disposés symétriquement tout autour de la base. Lors de la carbonisation, on adapte quatre cheminées (7) sur un conduit sur deux.

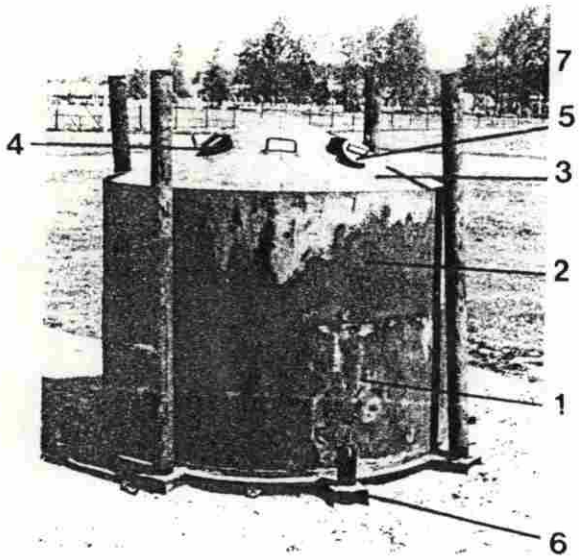


Fig. 17 Four métallique modèle TPI

2. Fabrication

Il faut les outils et équipements suivants.

1) Une machine à cintrer à rouleaux pour tôles jusqu'à 90 cm de large et 3 mm d'épaisseur.
2) Une machine à cintrer les cornières pour les cornières de renfort (un forgeron habile doit pouvoir le faire si l'on ne dispose pas de rouleaux à cintrer).
3) Equipement de soudure et de coupe oxyacétylénique.
4) Grand étau de mécanicien.
5) Outils à main, tels que scies à métaux, limes, chignole à main et forets.
6) Pinces pour tenir les pièces à souder.

* On trouvera une description détaillée (en anglais) de la construction du four T.P.I. dans une brochure publiée par le Tropical Products Institute sous le No. 13 de la série des "Rural Technology Guides" (34).

Il est souhaitable mais non indispensable d'avoir également:

7) Une cisaille à guillotine ou cisaille d'établi.

8) Une plieuse pour tôles jusqu'à 3 mm d'épaisseur.

9) Un équipement de soudure à l'arc (permettant un travail plus rapide).

Les matériaux nécessaires sont indiqués dans la liste ci-dessous. On n'obtiendra pas de bons résultats si l'on modifie les dimensions ou les proportions du four. Si l'on désire apporter des changements importants dans le dessin de ce four, il est recommandé de consulter au préalable le Tropical Products Institute.

On trouvera ci-dessous les instructions pour la construction et l'assemblage. La Fig. 18 donne le dessin du four avec les dimensions des divers éléments. Lire attentivement les instructions avant de commencer la construction du four.

2.1 Liste de matériaux

Partie du four		Matériau (acier doux)	Quantité suffisante pour couper:
Section inférieure	Cercles supérieur et inférieur	Cornière de 50x50x3 mm	6 morceaux de 243 cm de long
	Corps (méthode de construction 1)	Tôle de 3 mm (Note 1)	3 morceaux de 243x90cm
	Corps (méthode de construction 2)	Tôle de 3 mm	3 morceaux de 248x90cm
Section supérieur	Cercle supérieur	Cornière de 50x50x3 mm	3 morceaux de 239,8 cm de long
	Cercle inférieur	Fer plat de 50x3 mm	3 morceaux de 239,8cm de long
	Corps	Tôle de 2 mm	3 morceaux de 244,8x90cm
Couvercle	Secteurs du couvercle	Tôle de 2 mm	2 morceaux coupés aux dimensions indiquées Fig.22
	Orifices de vapeur	Fer plat de 50x3mm	4 morceaux de 63 cm de long
	Poignées de levage	Barre de ø 10mm (fer à béton)	4 morceaux de 50 cm de long
Bouchons d'orifices de vapeur (4 par four)	Corps	Soit fer plat de 50x3mm, soit tuyau acier de ø 140 mm(de préférence si disponible)	4 morceaux de 44 cm de long ou 4 anneaux de 5 cm de hauteur
	Disque supérieur	Tôle de 3 mm	4 disques de ø 19 cm
	Poignées	Barre de ø 5 mm (fer à béton)	4 morceaux de 18 cm de long
Conduits inférieurs	Section des conduits	Tôle de 3 mm	8 morceaux de 50x50 cm
	Embases de cheminées (Note 2)	Soit tôle de 3 mm, soit tuyau d'acier de ø 120 mm	8 morceaux de 37,5x15 cm ou 8 morceaux de 15 cm de long
Cheminées (4 par four)		Tuyau d'acier mince, ou tôle de 2 mm	4 morceaux de 230cm de long ou voir instructions pour calculer les quantités nécessaires.

Si possible utiliser pour les parties en tôle, au lieu d'acier doux, de l'acier Corten "A", ou un acier anticorrosion analogue, qui donneront une durée de vie plus longue du four. Il s'agit d'aciers contenant jusqu'à 3% de cuivre, chrome, vanadium et phosphore, qui forment une couche durable d'oxyde ne nécessitant pas d'autre protection. Si l'on ne dispose pas d'un tel acier, ou si le four doit être entreposé pendant quelque temps avant utilisation, peindre l'extérieur avec une peinture au minium ou autre antirouille. Une fois le four en service, la peinture sera peu à peu brûlée, mais elle assurera une certaine protection contre la corrosion extérieure.

Les tuyaux métalliques utilisés pour les cheminées doivent être à paroi mince (2-3mm d'épaisseur). Les dimensions indiquées sur le dessin (Fig. 18) peuvent être modifiées. Un diamètre compris entre 100 et 150 mm peut convenir. Les tuyaux de cheminée doivent s'ajuster convenablement sur les embases des conduits.

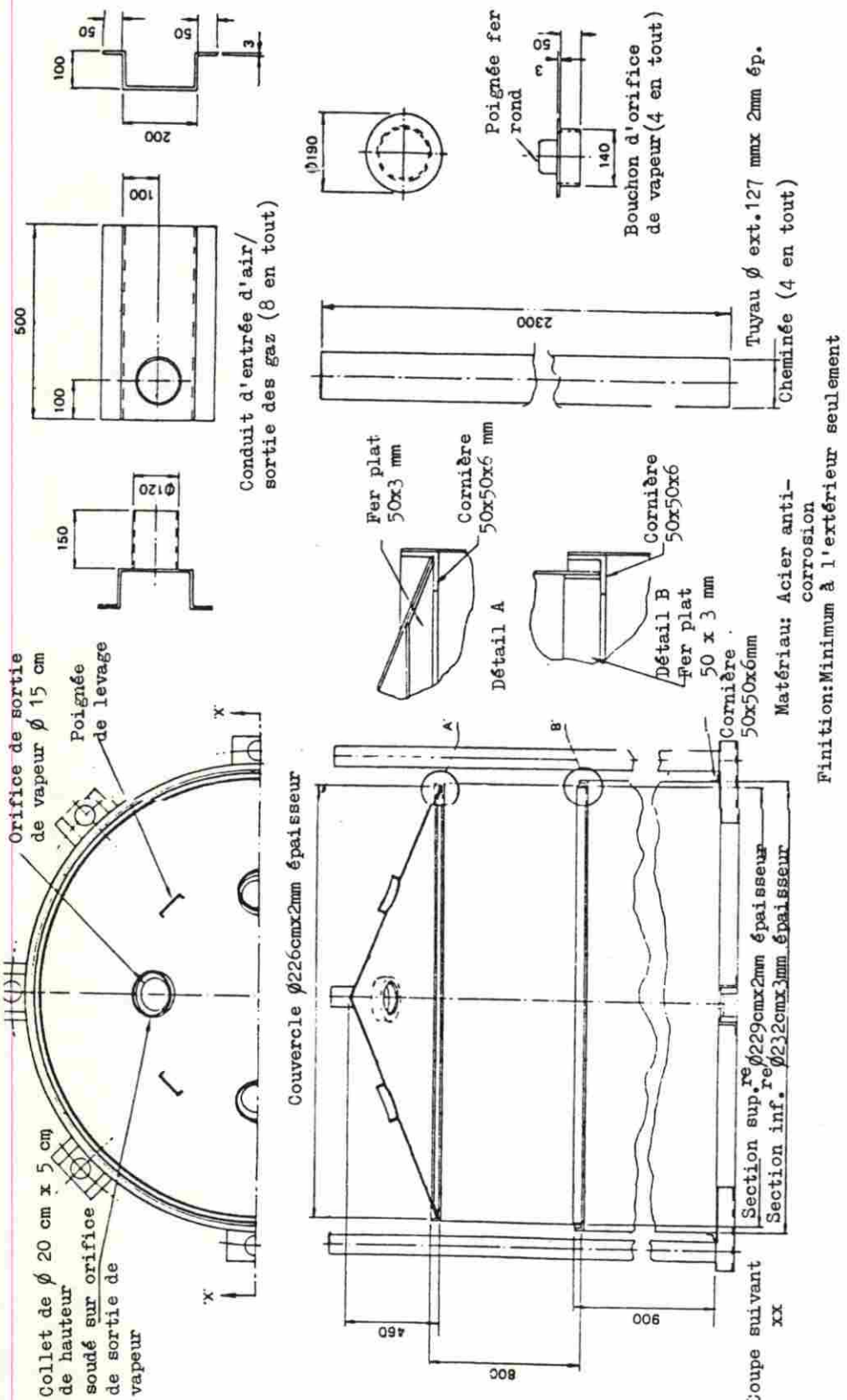
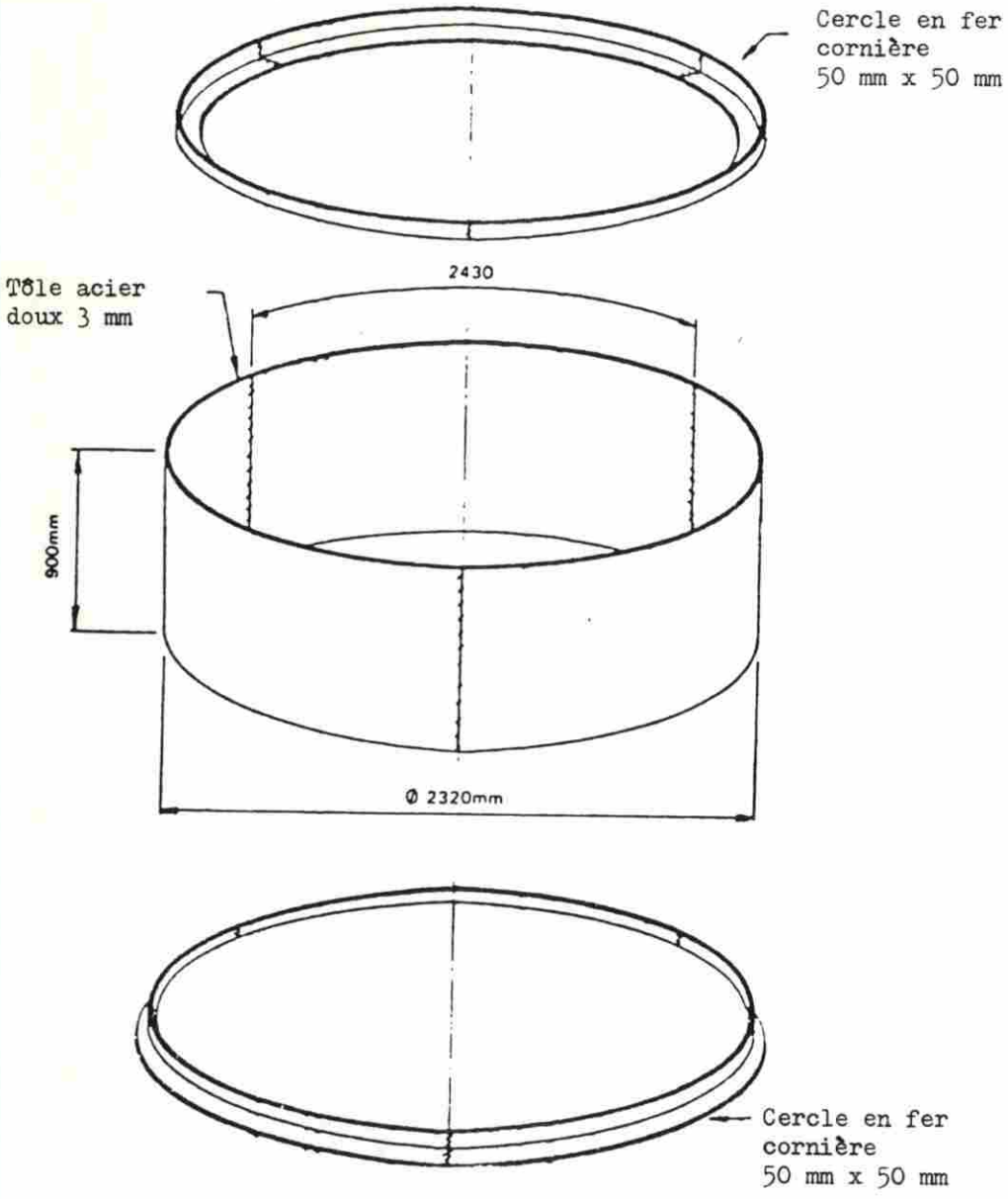


Fig.18. Détails de construction du four TPI

2.2 Construction de la section inférieure

Fig. 19 Section inférieure du four TPI



Cercles supérieur et inférieur:

1. Couper 6 longueurs de 243 cm de cornière 50 x 50 x 3 mm.
2. Prendre trois de ces longueurs pour faire le cercle inférieur. Les cintrer à la machine à cintrer ou à la forge à un rayon de 116 cm, le bord vertical étant à l'intérieur.
3. Vérifier que les extrémités s'ajustent bien entre elles - sinon les dresser à la scie à métaux.
4. Souder par points pour former un cercle.
5. Vérifier que le cercle repose bien à plat sur le sol - sinon le casser et le ressouder, ou le redresser par torsion jusqu'à ce qu'il soit bien plat.
6. Terminer les soudures.
7. Prendre les trois longueurs restantes pour faire le cercle supérieur. Les former en cercle, le bord vertical étant à l'extérieur.
8. Faire le cercle de la même façon que le cercle inférieur.

2.2.1 Corps (Méthode 1)

1. Couper 3 pièces de tôle de 3 mm à la dimension de 243 x 90 cm.

2. Bien ébarber les arêtes.

3. Cintrer ces tôles au rayon de 116 cm, à l'aide de la machine à cintrer à rouleaux.

4. Les souder ensemble par points pour former un cylindre.

5. Vérifier que les cercles s'ajustent bien sur ce cylindre, et les souder en place en trois points de la circonférence. Noter que le cercle inférieur s'ajuste à l'extérieur du cylindre, le cercle supérieur à l'intérieur.

6. Vérifier que le cylindre repose droit sur le sol.

7. Si tout va bien, souder les joints. Les joints de soudure du cylindre doivent être continus. Toute solution de continuité permettrait une entrée d'air dans le four.

8. Souder les cercles. Dans ce cas, des points de soudure espacés sur toute la circonférence sont suffisants, étant donné que les vides seront obstrués par de la terre ou du sable lorsque le four sera en service.

2.2.2 Corps (Méthode 2)

Cette méthode permet une soudure plus facile.

1. Couper 3 pièces de tôle à la dimension de 248 x 90 cm.

2. Bien ébarber les arêtes.

3. Cintrer ces tôles au rayon de 116 cm, à l'aide de la machine à cintrer à rouleaux.

4. Les souder ensemble par points pour former un cylindre. Leur longueur supplémentaire donne un recouvrement de 5 cm à chaque joint.

5. Ajuster le cercle inférieur à l'extérieur du cylindre, le cercle supérieur à l'intérieur.

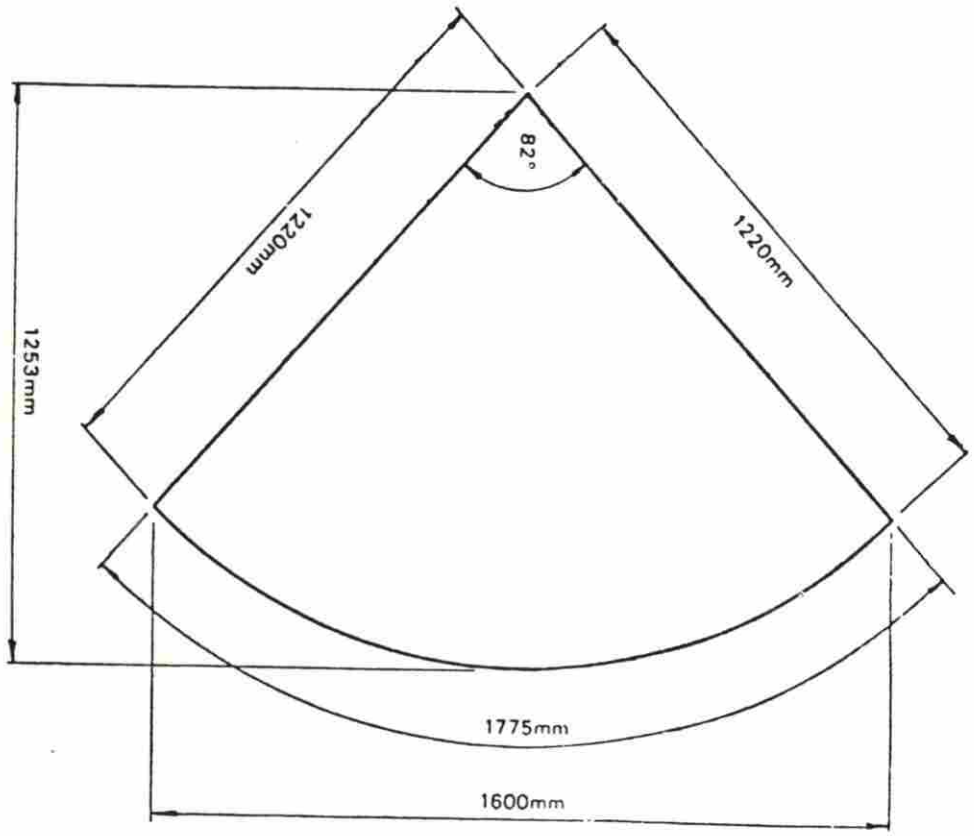
6. Vérifier que le cylindre repose droit sur le sol.

7. Souder les joints du cylindre à l'intérieur et à l'extérieur. Les joints de soudure extérieurs doivent être continus pour éviter l'entrée d'air dans le four. Le joint intérieur peut être discontinu. Il est plus facile de souder un recouvrement que de souder deux tôles bout à bout, et cette méthode permet en outre une marge d'erreur.

8. Souder les cercles définitivement en place comme ci-dessus.

2.3 Construction de la section supérieure

Fig. 20 Section supérieure du four TPI



Cercles supérieur et inférieur:

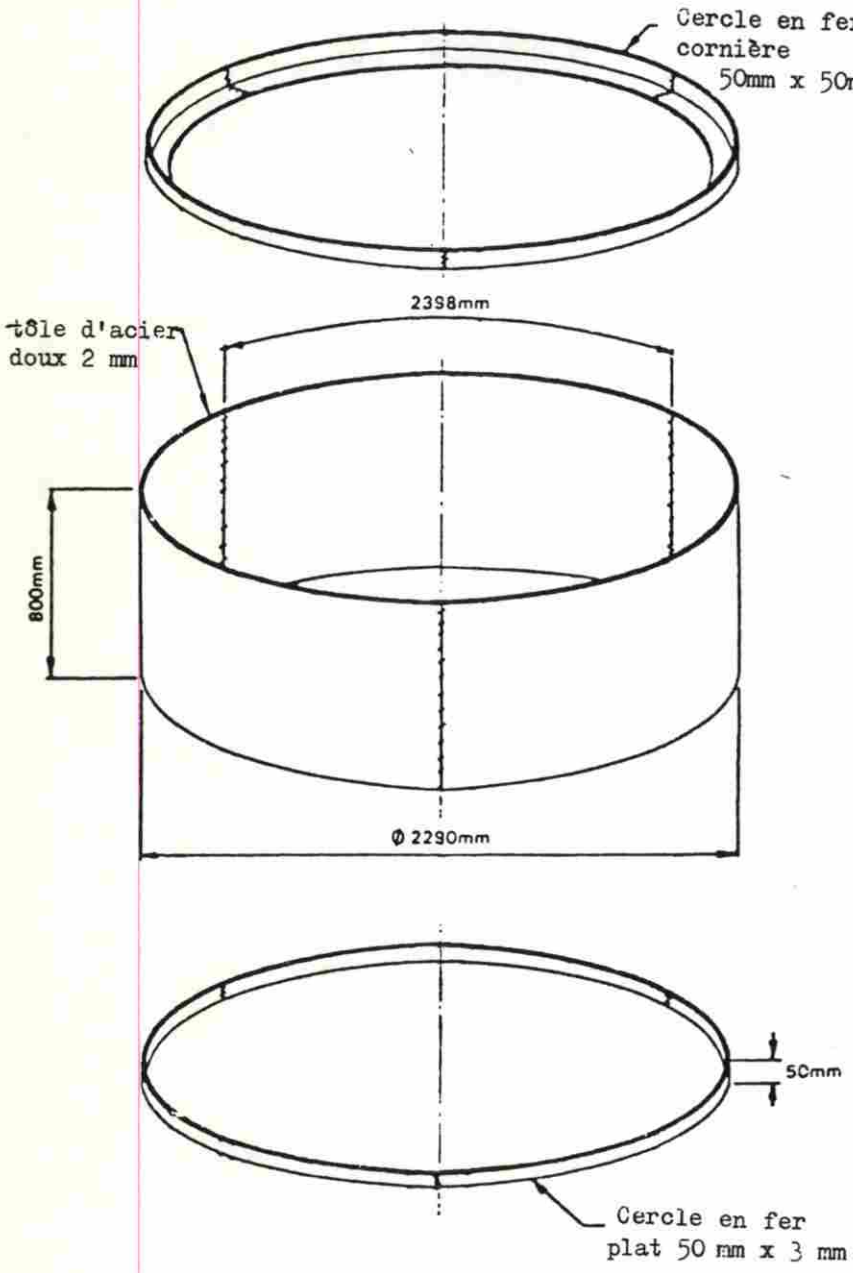
1. Couper 3 longueurs de 239,8 cm de fer plat de 50 x 3 mm pour faire le cercle inférieur.
2. Les cintrer à un rayon de 114,5 cm.
3. Les souder par points pour former un cercle.
4. Poser le cercle à plat sur le sol pour vérifier qu'il est bien plan.
5. Terminer les soudures.
6. Couper 3 longueurs de 239,8 cm de cornière de 50x50x3 mm pour faire le cercle supérieur.
7. Les cintrer à un rayon de 114,5 cm, le bord vertical à l'extérieur.
8. Les souder en cercle comme décrit plus haut.

2.3.1 Corps

1. Couper 3 pièces de tôle de 2 mm à la dimension de 244,8 x 80 cm.
2. Les cintrer à un rayon de 114,5 cm.
3. Les assembler en cylindre comme décrit pour la section inférieure (Corps: Méthode 2). Noter que le cercle de fer plat est soudé à l'intérier du bord inférieur, le cercle de fer cornière à l'intérieur du bord supérieur.
4. S'assurer au stade de la soudure par points que le cylindre s'ajuste correctement sur la section inférieure.

2.4 Construction du couvercle

Fig. 21 Tracé d'un secteur de couvercle (4 par couvercle)

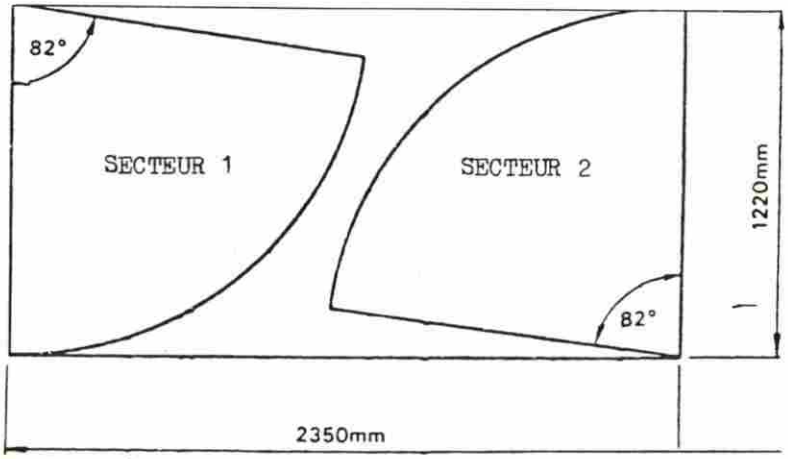


1. Tracer 4 pièces de tôle de 2 mm en forme de secteur circulaire, aux dimensions indiquées sur la Fig.21. On peut couper deux pièces dans une feuille de tôle de dimensions normalisées 235x122 cm, comme le montre la Fig. 22

2. Découper les secteurs circulaires, ébarber les arêtes.

3. Tracer et découper un trou circulaire de Ø 15 cm sur chaque secteur, pour faire l'orifice de sortie de vapeur.

Fig.22 Découpage de deux secteurs de cercle dans une tôle de dimensions normales 235 x 122 cm



2.5 Construction des cheminées

Conduits inférieurs (au nombre de 8)

1. Couper 8 pièces de tôle de 3 mm, de 50 x 50 cm.
2. Plier comme indiqué sur le dessin (Fig. 18) pour former une gouttière de section rectangulaire. Si l'on ne dispose pas d'une plieuse, le pliage peut être exécuté sur un étau d'établi. Tracer les lignes de pliage sur la tôle, et faire chaque pli en plusieurs fois. Ne pas essayer de faire un pli à 90° en une seule fois.
3. Pour faire les embases de cheminée couper 8 longueurs de 15 cm de tuyau d'acier de ∅ 120 mm, ou bien 8 morceaux de tôle de 3 mm de 37,5 x 15 cm, et les enrouler pour former un tube de 12 cm de diamètre. S'assurer qu'ils ont tous autant que possible le même diamètre.
4. Sur chaque conduit tracer un cercle dont le centre soit situé à 10 cm de l'une des extrémités.
5. Découper soigneusement les trous au diamètre intérieur des embases.
6. Souder les embases en place sur les trous. S'assurer qu'elles sont bien verticales.

Cheminées (au nombre de 4)

Les cheminées doivent s'emboîter sans serrer sur les embases des conduits, sinon, lorsque le four est chaud, il pourrait être impossible de les retirer. Elles ne doivent pas non plus avoir trop de jeu.

1. Couper simplement 4 longueurs de 230 cm, si l'on dispose de tuyau d'acier convenable.
2. Si l'on n'a pas de tuyau, on fera les cheminées en tôle, d'une seule pièce si l'on dispose d'une cintreuse à rouleaux suffisamment large (230 cm) sinon en plusieurs sections que l'on assemblera ensuite.
3. Diviser la longueur de la cheminée (230 cm environ) en un nombre aussi réduit que possible de tronçons égaux que la machine à cintrer permette de former. Ajouter à chaque tronçon une longueur de 5 cm pour avoir un recouvrement pour l'assemblage des sections de cheminée.

   Vérifier que cette dimension passe encore entre les rouleaux de la machine à cintrer, par exemple si celle-ci a une largeur de 90 cm trois longueurs de 77 cm donneront une hauteur de cheminée de 231 cm. En ajoutant la longueur de recouvrement de 5 cm on aura une longueur de section de : 77 + 5 = 82 cm.
4. Couper le nombre voulu de pièces en tôle de 2 mm.
5. Les former en tubes. Ceux-ci doivent avoir des diamètres légèrement différents, de telle sorte que la section supérieure soit légèrement plus petite que celle située en dessous et s'y emboîte étroitement, cette dernière s'emboîtant à son tour dans la suivante, et ainsi de suite.

6. Assembler les sections de tuyau, en les poussant de 5 cm environ à l'intérieur de la section située au-dessous.

   S'assurer que la cheminée assemblée est suffisamment droite, et repose verticalement sur les conduits.

7. Souder entre elles les sections de cheminées, mais ne pas souder les cheminées sur les conduits.

Annexe 3

CONSTRUCTION ET FONCTIONNEMENT DU FOUR ARGENTIN HEMISPHERIQUE

Ce four a une forme hémisphérique, et un diamètre variant entre 5 et 7,50 mètres. La capacité du four et la durée du cycle varient comme suit en fonction du diamètre:

Diamètre (m)	Volume brut (m^3)	Durée du cycle (jours)
5,0	32	7-8
6,0	56	8-10
7,0	90	15-17
7,5	110	17

Un four de 6 m de diamètre nécessite environ 6000 briques de 24 x 12 x 6 cm.

La capacité de charge réelle est inférieure au volume brut, en raison de la forme hémisphérique. Un four de 7 m de diamètre a une capacité de charge pratique d'environ 60 stères de bois, soit les deux-tiers du volume brut. Ce rapport est un peu inférieur pour les fours plus petits.

Le diamètre le plus courant est d'environ 7 m. Le rendement à la carbonisation est variable, mais normalement il faut de 4,5 à 6 tonnes de bois pour produire 1 tonne de charbon.

1. Choix de l'emplacement et préparation du terrain

Voir paragraphe 7.1.1, chapitre 7 du manuel.

2. Maçonnerie de briques

Planter un piquet à 30 cm de hauteur environ au centre du four à construire. Au sommet de ce piquet, attacher au moyen d'une lanière de cuir une perche de bois légère de longueur égale au rayon du four. Planter vers son extrémité un gros clou qui indiquera avec précision le point où chaque brique doit être posée (Fig. 23, photo 14).

Le soubassement du four est bâti dans une tranchée circulaire, d'un rayon correspondant à la longueur de la perche servant de compas. Cette tranchée aura 0,30 m de profondeur, et une largeur correspondant à une longueur de briques. Le soubassement, fait à cette largeur, comportera trois lits de briques. A l'emplacement des deux portes, il aura 0,45 m de large, pour fournir une fondation solide.

Les briques sont liées au mortier de terre, composé d'argile, de sable et de poussier de charbon de bois. Il doit être dur et solide une fois sec, sans s'écailler ou se craqueler. Les joints doivent être minces, sinon le four manquera de solidité et de durabilité.

Au niveau du sol poser le premier lit de briques circulaire du four, en se servant de la perche comme compas pour conserver le diamètre intérieur correct. Les trois premiers lits au-dessus du soubassement sont en double épaisseur sur toute la circonférence.

Laisser 12 orifices d'entrée d'air au niveau du sol, régulièrement espacés, d'environ 7 x 7 cm de section.

A partir de ce point laisser des briques en saillie vers l'extérieur de part et d'autre des ouvertures de portes, de façon à former des piliers en double épaisseur de briques qui renforceront le four autour des portes (voir Fig. 23, photos 15, 16, 17). Le mur du four lui-même est en simple épaisseur.

Prendre soin, lorsque la maçonnerie approche du sommet, de poser chaque brique bien appliquée sur sa voisine, en maintenant les joints aussi minces que possible, de façon que chaque rang de briques soit bien serré, et que les briques ne puissent pas se détacher si le mortier tombe lorsque le four est en service.

Au sommet du four laisser une ouverture circulaire ou "oeil", d'environ 20 cm de diamètre. Il servira pour l'allumage, et pour la sortie de fumée au cours de la carbonisation.

Avant de mettre le four en service, il faut le laisser sécher pendant deux ou trois mois. Les murs et le sol en terre battue seront complètement secs après les trois ou quatre premières fournées. Les fissures et pores des briques se colmatent par le goudron. Pendant cette période initiale on obtient un rendement en charbon plus faible, en raison de l'étanchéité encore imparfaite, et de la chaleur supplémentaire nécessaire pour sécher le sol et les parois de briques.

Toutes les fissures qui apparaissent dans les parois du four doivent être immédiatement colmatées par de la boue liquide, et les briques détachées ou défectueuses remplacées. C'est surtout important au début, mais il faut également par la suite inspecter et réparer le four après chaque fournée pour lui assurer une longue durée de service.

Il convient de renforcer suffisamment les ouvertures de portes, qui sont soumises à des chocs lorsqu'on charge le bois dans le four. On peut placer un poteau en fer ou en bois, écarté du mur, de chaque côté de la porte pour absorber les coups accidentels lors du chargement.

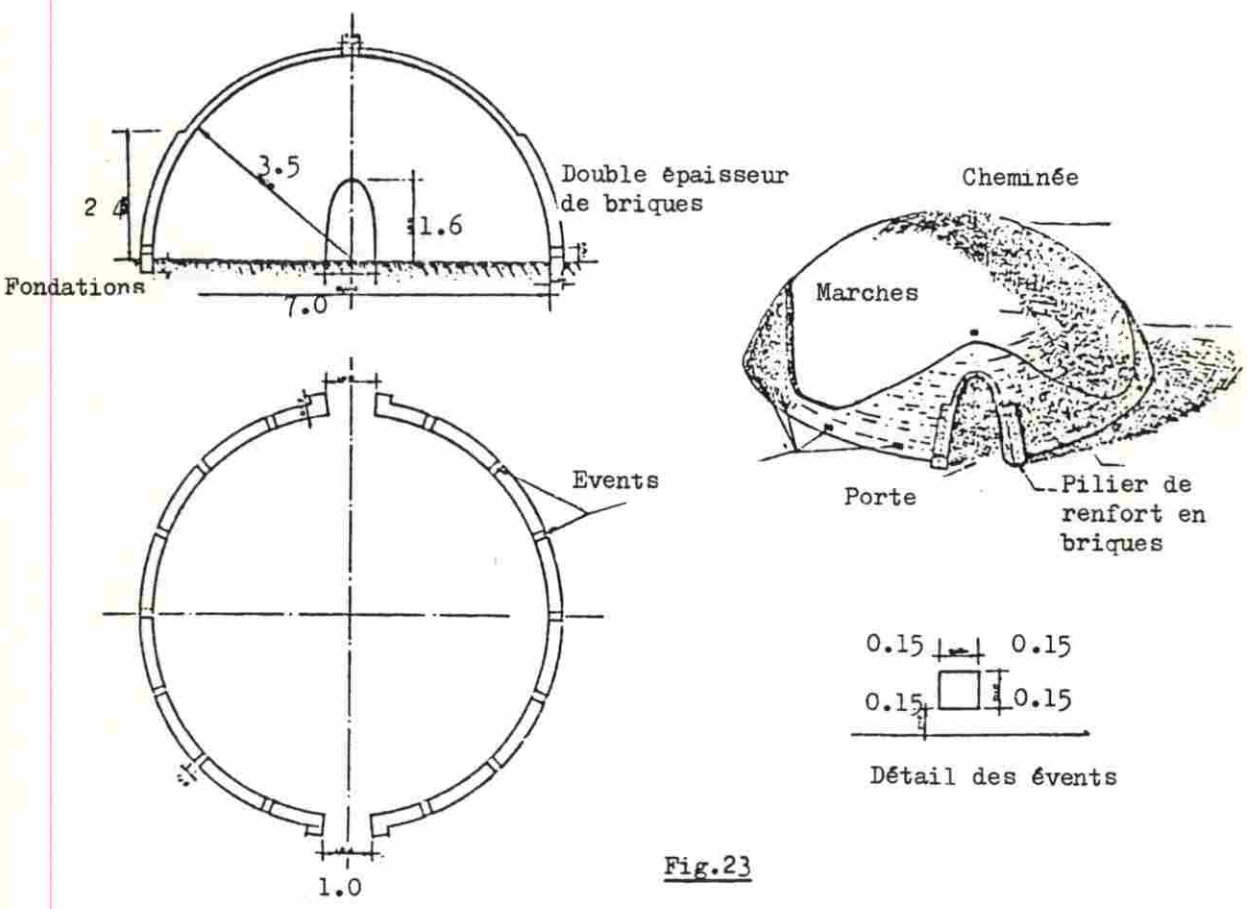


Fig.23

Annexe 4

QUELQUES CHIFFRES ET FACTEURS DE CONVERSION UTILES

Densité:

Densité apparente du charbon de bois commercial	= 250 à 300 kg/m^3
Poids approximatif d'une stère de:	
- Pinus radiata de plantation (partiellement sec)	= 550 à 650 kg
- Eucalyptus de plantation (partiellement sec)	= 600 à 700 kg
- Bois feuillu tropical de moyenne densité (partiellement sec)	= 700 à 800 kg
- Bois feuillu tropical dense	= 900 kg

Puissance et énergie:

1 kilowatt (kW)	= 1,36 cheval-vapeur (ch) = 1,34 horsepower (hp)
1 cheval-vapeur (cv)	= 75 kilogrammètres/seconde (kgm/s) = 0,736 kilowatt (kW) = 0,986 horsepower (hp)
1 horse-power (hp)	= 0,746 kilowatt (kW) = 1,014 cheval-vapeur (cv)
1 kilojoule (kJ)	= 0,001 mégajoule (MJ) = 0,239 kilocalorie (kcal) = 0,000278 kilowatt-heure (kWh) = 0,948 British Thermal Unit (BTU)
1 kilowatt-heure (kWh)	= 3600 kilojoules (kJ) = 3,6 mégajoules (MJ) = 3412 British Thermal Units (BTU)

Préfixes de multiples

10^{12}	téra	T
10^{9}	giga	G
10^{6}	méga	M
10^{3}	kilo	k
10^{2}	hecto	h
10^{1}	déca	da

Pouvoir calorifique en kJ/kg (pour l'exprimer en d'autres unités voir facteurs de conversion ci-dessus).

Combustible	Pouvoir calorifique (kJ/kg)
Bois vert *	15 000
Bois sec *	19 000
Charbon de bois	31 000
Coke	30 000
Houille grasse	27 000
Mazout	44 000
Pétrole lampant	46 000
Goudron de bois	20 000
Gaz naturel	45 000
Gaz pauvre de gazogène	5 000
Gaz de four cornue à bois	6 000

*) Influence de l'humidité du bois sur son pouvoir calorifique :
Pouvoir calorifique net (kJ/kg) = 19 000 - 220 M
(M = teneur en humidité en pourcentage du poids total).

ETUDE DE VALORISATION

DU BOIS DE LA KOMPIENGA

-o-o-o-o-o-o-

JUIN 1987

OLOUKOI
HENRI

B U R K I N A F A S O

ECOLE INTER-ETATS D'INGENIEURS DE L'EQUIPEMENT RURAL

ETUDE DE VALORISATION

DU BOIS DE LA KOMPIENGA

OLOUKOI HENRI

16è PROMOTION

E I E R

[illegible]

--o--o--o--o--o--

REMERCIEMENTS

Cette étude n'aurait été possible sans l'étroite collaboration de Monsieur PHILIPON - mon maître - et de Monsieur BORTOLI (CILSS).

Je remercie donc sincèrement mon maître pour ses multiples conseils. Je salue la disponibilité "légendaire" de Monsieur BORTOLI dont l'apport à la réalisation de cette étude est inestimable.

A travers Monsieur NAKOULMA Laurent, je remercie tous les forestiers affectés au Projet "Valorisation du bois de la Kompienga".

Pour terminer, je ne saurais m'empêcher de remercier tous ceux qui travaillent au développement harmonieux de l'E.I.E.R.

OUAGADOUGOU, JUIN 1987.

1. INTRODUCTION

Situé au coeur de l'Afrique Occidentale, le Burkina s'étend sur une superficie de 274 000 km^2. Ce pays du Sahel dispose de ressources énergétiques limitées, issues essentiellement de la biomasse (surtout du bois). Le bois de chauffage est de loin la principale source d'énergie du pays. La forêt naturelle s'étend sur 15,5 millions d'hectares (soit 56 % de la superficie du territoire national) auxquels s'ajoutent les formations forestières créées par l'homme, notamment les zones de jachères forestières et des parcs forestiers, couvrant 8,8 millions d'hectares. Actuellement le déficit en bois de chauffage est de 2,2 millions de m^3/an. Or l'élimination du bois dans la retenue du barrage de Kompienga s'impose, parce que d'une part la décomposition de la biomasse dans la retenue provoque l'eutrophisation de l'eau et d'autre part la présence de bois flottants dans la retenue risque d'abîmer les turbines (cas du barrage de Côte d'Ivoire).

Dans ces conditions, quelle attitude adopter à l'égard du bois situé dans la future zone inondable ? Tout d'abord, un défrichement dans un pays sahélien peut choquer plus d'une personne (exemple du cas de Manantali). Mais peut-on aussi accepter, dans un pays confronté aux effets néfastes du déficit de bois de chauffe, brûler toute la masse ligneuse située sur plus de 20.000 ha ?

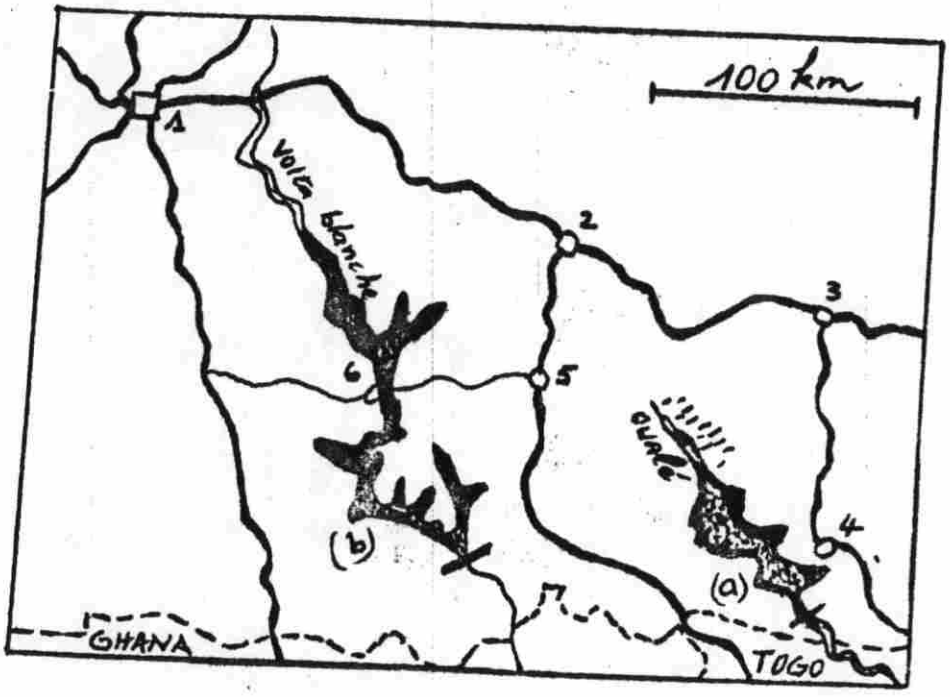
L'acuité du problème n'autorise aucune passivité. A preuve :

- Le F.E.D. (Fonds Européen de Développement) s'engage à débloquer immédiatement un Fonds pour la location de matériel de terrassement en vue de préparer les pistes et rapidement des fonds pour envoyer des formateurs avec leur matériel pédagogique.

- Le K. f. W. (Kreditanstalt fur Wiederaufban), fonds allemand, s'engage à ouvrir un crédit de 2 millions de D M (environ 300 millions de F.CFA) pour l'achat du matériel de transport et de coupe du bois.

Ensuite, toute sorte de réflexion sur le projet "Valorisation du bois de la retenue de Kompienga" doit être dominée par la pression

Madigui
R É S E R V
Kompiembiga
Nboumonga
Diamangré
Naloanga
Diamanga
Tagou Naloni
Diabiga Gourma
Diabiga Yanga
Sissé
Ogagou
Pognoa Sankoado
Pognoa Tikonti
Pankankonti
Tétourgou
0°40'



Légendes

1 : Ouagadougou

2 : Koupéla

3 : Fada-Ngourma

4 : Pama

5 : Tenkodogo

6 : Niaogo

(a) Barrage de Kompienga

(b) Barrage de Bagre

figure n° 0

3.2. Présentation des systèmes de transformation

3.2.1. Bois de service et bois d'oeuvre

Sur la base de l'inventaire réalisé (voir 3.1.), on estime à environ 6 000 m^3 le bois d'oeuvre venant essentiellement de la formation galerie, de la savane arborée et des jachères.

Les essences principales qui se prêtent comme bois d'oeuvre sont, par ordre d'importance, le pterocarpus sp., le Butyrospernum p, le Terminalia spec, l'anogeissus (à égalité avec le Terminalia) et la Cannea sp.

Le débardage se fera par le MB-trac jusqu'à un endroit près d'une piste carrossable. Une équipe munie d'une scie à grumme portative sciera le tronc en équerre pour faciliter le transport vers le dépôt du bois où une autre scie permet de produire les assortiments demandés : lattes, chevrons, planches etc...

Les troncs sont façonnés de deux ou, au maximum, quatre côtés. Pour le transport des troncs, on doit prévoir une rémorque grumier avec une charge utile de 10 tonnes tractée par un MB Trac 1 300. Le chargement se fera par le MB Trac muni d'un treuil arrière à double tambour.

Pour la scie au dépôt, il est recommandé une scie circulaire. Il faudrait prévoir la formation d'une équipe de 3 hommes, composée d'un scieur et de deux aides.

Le bois de service sera essentiellement composée de perches, de poteaux et de fourches. Le rônier est l'essence ayant le plus de valeur pour ces produits.

Il faudrait prévoir au niveau du dépôt de bois un site de fendage. Le pied mâle de rôniers a une valeur économique extrêmement élevée surtout vers le Niger. Par contre, le pied femelle est creux à l'intérieur. Seule alors sa paroi extérieure est utile.

3.2.2. La carbonisation

3.2.2.1. Expérience

A partir d'une expérience facilement réalisable en laboratoire, décrivons le principe du processus de la carbonisation et déduisons-en quelques définitions - (cf figure n° 1).

Chauffons, dans un ballon pyrex et à l'abri de l'air, des petits morceaux de bois. Si ceux-ci n'ont pas été préalablement déshydratés dans une étuve, on note d'abord un dégagement gazeux (C), absolument ininflammable. En refroidissant le tube en verre (B) avec de l'eau, on constate que ce n'est que la vapeur d'eau. Refermons le robinet.

Le dégagement gazeux s'intensifie et change de couleur, devenant jaune brunâtre, facilement condensable, c'est encore de l'eau à laquelle se mêlent des goudrons que l'on peut recueillir en (D).

En continuant la chauffe, le dégagement s'intensifie de plus en plus, accompagné d'un distillat de couleur brunâtre à marron foncé. Les gaz qui se dégagent maintenant sont inflammables. On constate que le bois a pris une couleur brun café, s'obscurcissant de plus en plus. Le distillat condensé est de plus en plus épais (goudrons).

Même en diminuant le chauffage extérieur apporté par le bac (Bunsen ou Mecker), la production de gaz combustible continue. Ensuite, la production de gaz combustibles diminue jusqu'à extinction, même si l'on persévère à chauffer.

Le bois est devenu noir. Arrêtons alors toute chauffe extérieure et laissons refroidir lentement le ballon en évitant surtout toute introduction d'air dans celui-ci.

Lorsque la température a suffisamment baissé, on récupère le principal résidu contenu dans le ballon. C'est un produit noir, plus ou moins foncé, plus "léger" (moins dense) que celui initialement introduit, friable, susceptible d'absorber facilement de l'eau (hydrophile). C'est du charbon de bois, nous avons réalisé une carbonisation, c'est à dire une décomposition thermique en l'absence de l'air.

L'ensemble des liquides résultant de l'expérience s'appelle jus pyroligneux. Les morceaux incomplètement carbonisés sont appelés incuits.

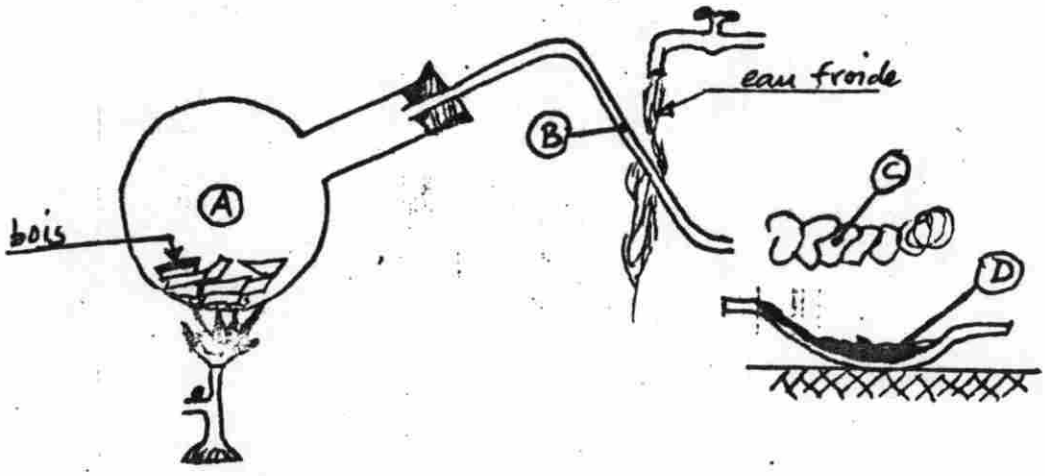


figure n° 1 UNE EXPERIENCE

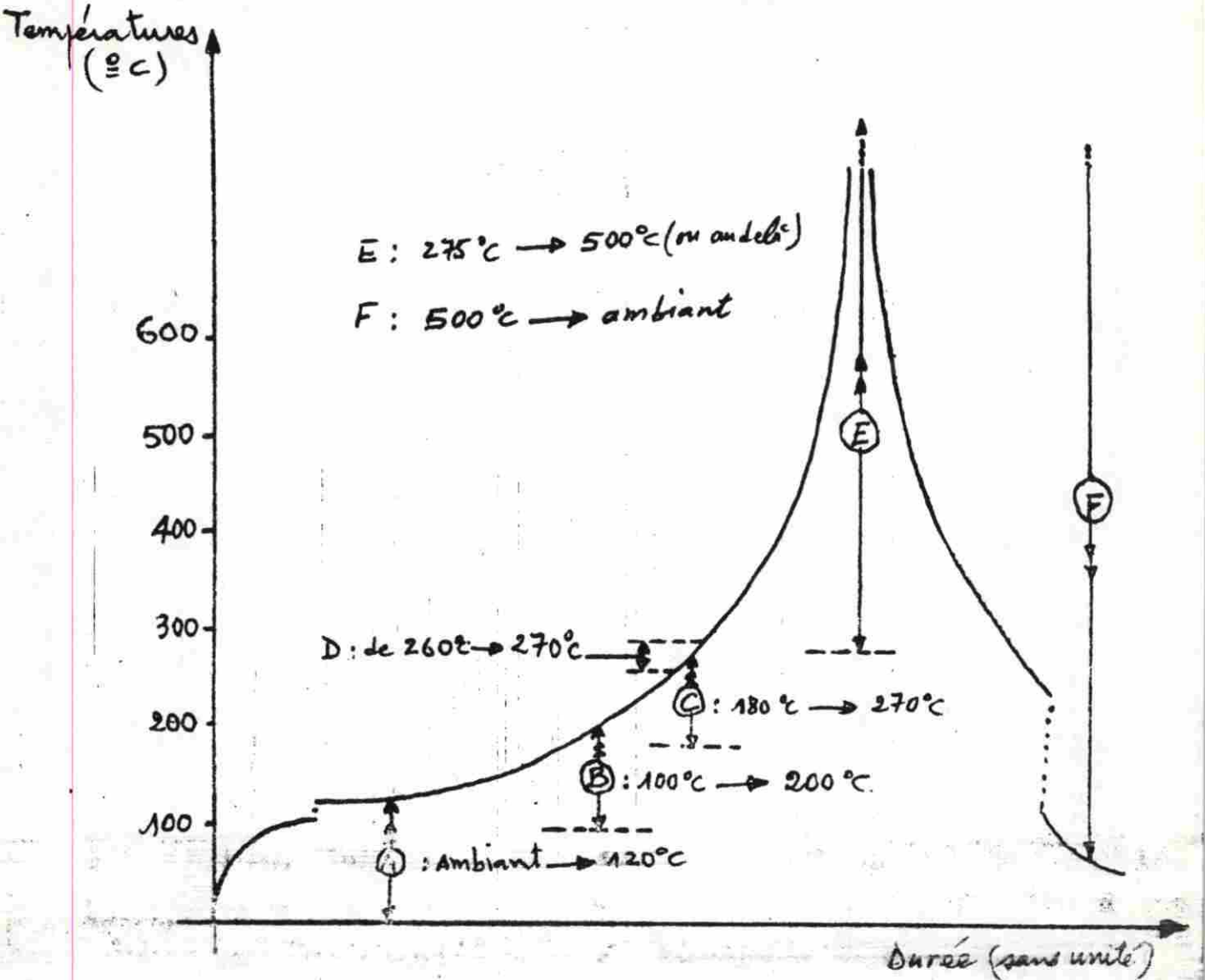


figure n° 2 TEMPÉRATURE EN FONCTION DU TEMPS

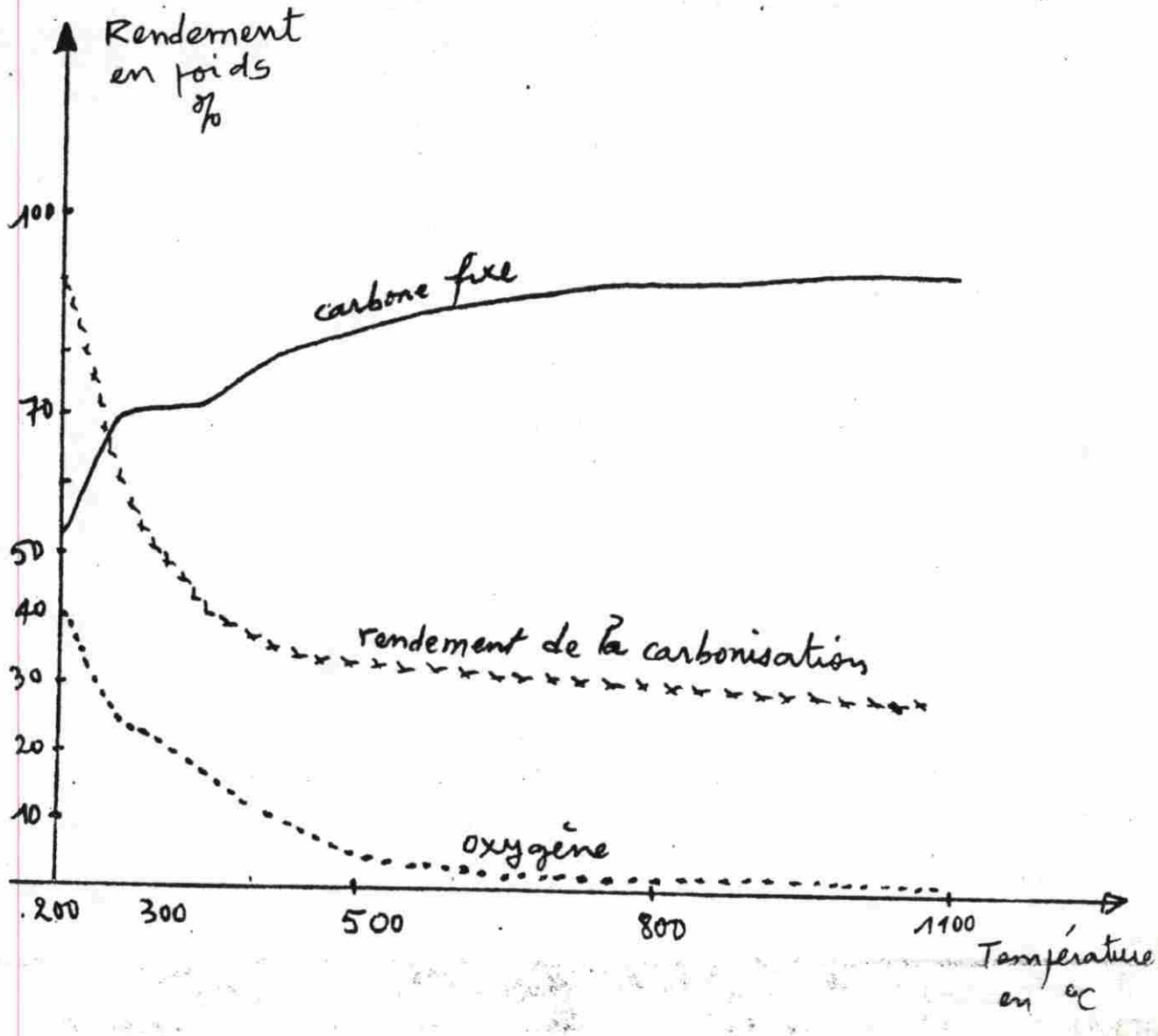


figure n°3 ÉVOLUTION DE LA COMPOSITION DU CHARBON DE BOIS

Dans la pratique, on utilisera, selon la nature du produit final recherché, les termes carbonisation (charbon de bois), distillation (jus pyroligneux), gazéification (gaz) pour désigner le même processus.

3.2.2.2. Phases de la carbonisation

Communément, on décrit le processus de carbonisation - indépendamment du procédé de carbonisation - par une suite de plages de température. Toutefois, les durées des transformations correspondant à ces plages varient considérablement selon la technologie utilisée. (cf. figure n° 2).

a). Période de chauffage du bois (A)

Elle s'étend de la température ambiante à 120°C. Le bois commence par perdre son eau et se dessèche (simplement). Il ne subit pas encore de changements d'ordre chimique.

b). Période de séchage du bois (B)

La température du bois passe de 100°C à 200°C. Au cours de cette phase, le bois perd le reste d'eau qu'il contenait. Vers 150°C, le bois brunit et on peut déceler la présence de l'acide acétique dans l'eau condensée.

Cette phase, comme la précédente, nécessite un fort appel de chaleur externe pour se poursuivre, elle est dite endothermique. Signalons à l'intention des charbonniers que plus le bois est humide, plus il faut de temps (donc de combustible) pour évaporer toute l'eau, plus le résultat de carbonisation sera faible (donc rendement faible) et plus les étapes A et B seront longues. Ainsi, on réduirait notablement les étapes A et B en séchant gratuitement le bois au soleil avant sa carbonisation.

c). Torréfaction du bois (C)

C'est également une phase endothermique de 180°C à 270°C. Les constituants les moins stables du bois se décomposent de plus en plus les produits volatiles se dégagent de plus en plus abondamment. On constate la présence de gaz carbonique (CO_2), du monoxyde de carbone

(CO) et encore de la vapeur d'eau dans les fumées qui s'échappent. Le bois roussit franchement, prenant la couleur du café torréfié. Il contient 45 à 65 % de carbone fixe selon l'essence.

d). Amorce de la phase exothermique (D)

Dans cette petite plage, s'amorce un ensemble de réactions qui dégagent de la chaleur.

La cellulose et la ligne du bois sont partiellement transformées en charbon de bois solide et partiellement volatisées en produits liquides ou gazeux à la suite de quelques réactions avec l'oxygène et l'hydrogène provenant également de la décomposition pyrogénée du bois.

On note le dégagement du gaz carbonique (CO_2), du CO, de la vapeur d'eau (H_2 O), de l'acide acétique (CH_3 COOH), du méthanol (CH_3 - OH), de l'hydrogène (H) en très faible quantité et quelques hydrocarbures.

La production de jus pyroligneux devient importante et les dégagements gazeux, en augmentant considérablement, approchent de leur débit maximum.

e). Carbonisation proprement dite (E)

A partir de 275°C, les réactions qui ont lieu deviennent exothermiques (dégagent de la chaleur). Elles continueront jusqu'à ce que tout le bois ait atteint une température de l'ordre de 480-500°C.

Toutefois, c'est vers 280°C que le bois est en pleine décomposition. La température s'élève alors rapidement. C'est le moment où les réactions chimiques sont les plus intenses. Par conséquent, les pressions internes augmentent et donc cette période est la plus destructive pour les matériaux solides constituant le four.

En plus de l'acide acétique et de l'alcool méthylique, l'acétone (CH_3COCH_3) et le méthyl-éthyl cétone ($CH_3CH_2COCH_3$) se dégagent.

Le dégagement du monoxyde de carbone et du gaz carbonique continue mais en moindre proportion que dans les deux phases antérieures. Par contre, le dégagement des hydrocarbures - par rapport à la phase précédente - passe de 3 % à 40 % du total du dégagement des gazeux incondensables.

Dans la plage 350 - 380°C, des goudrons lourds se dégagent. De même, les hydrocarbures produits sont plus "lourds" que les précédents. Si l'on arrête le processus à ce stade, on obtient un charbon de bois contenant de 75 à 90 % environ de carbone fixe selon les essences.

Continuer l'opération au delà de 500°C exige un apport de chaleur. Les gaz produits pendant cette phase (t > 500°C) deviennent moins importants, la teneur en hydrogène augmente. (cf. tableau - Phases de la pyrolyse du bois). Le taux de carbone fixe s'accroît aussi, atteignant 90 à 95 % et même plus selon les essences.

f). Phase de refroidissement

Pendant cette période, on laisse refroidir la charge de bois carbonisé. On évitera absolument toute introduction d'air frais sinon, on provoquerait une reprise locale de la combustion vive qui pourrait se propager et détruire une part significative de la production.

Le charbon de bois pouvant s'enflammer dans l'air, il est important de bien le laisser refroidir avant la mise en sac.

PHASES DE LA PYROLYSE LENTE DU BOIS

(Cf Guide technique de la carbonisation)

PHÉNOMÈNES PRÉPONDÉRANTS		DÉPART DE L'EAU	DÉGAGEMENT GAZ OXYGÉNÉS	DÉPART DU DÉPART DES HYDROCARBURES	PHASE A HYDROCARBURES $C_m H_n$	DISSOCIATION	PHASE A HYDROGÈNE
TEMPERATURE °C		150-200	200-280	280-380	380-500	500-700	700-900
TENEUR EN CARBONE (% du CHARBON)		50-60	60-70	70-78	78-85	85-90	90-95
GAZ INCONDENSABLES %	CO_2	68,0	66,5	35,5	31,5	12,2	0,5
	CO	30,0	30,0	20,5	12,3	24,6	9,7
	H_2	0,0	0,2	6,5	7,5	42,7	80,9
	HYDROCARBURES	2,0	3,3	37,5	48,7	20,5	8,9
POUVOIR CALORIFIQUE PAR m^3 GAZ MJ (Kcal)		4,6 (1100)	5,06 (1210)	16,4 (3920)	20 (4780)	15,2 (3630)	13,2 (3160)
CONSTITUANTS CONDENSABLES DANS LES GAZ		EAU	EAU ACIDE ACETIQUE	ACIDE ACETIQUE METHANOL GOUDRON LEGER	BEAUCOUP DE GOUDRONS EPAIS	GOUDRON PARAFFINE	PEU DE CONDENSATION
QUANTITE DE GAZ		TRÈS FAIBLE	FAIBLE	IMPORTANTE	IMPORTANTE	FAIBLE	TRES FAIBLE

Ce découpage, bien qu'apparemment différent, n'est pas incompatible avec celui présenté antérieurement.

Dans ce tableau, on s'intéresse spécifiquement aux produits dégagés, résultant des transformations du bois au cours de sa pyrolyse et non à ses transformations elles-mêmes.

3.2.2.3. Principaux facteurs influants sur le processus de la carbonisation

Les spécialistes de la carbonisation, même s'ils ne sont pas unanimes sur les durées des différentes phases, reconnaissent tous l'importance des paramètres suivants : la teneur en eau du bois, l'essence carbonisée et la température de carbonisation.

a. Influence de la température

La température, à n'en point douter, est le facteur le plus important de la carbonisation. En effet, elle conditionne les propriétés physico-chimiques du charbon de bois.

En examinant les courbes de la figure n° 3, on comprend mieux comment la température influe sur la qualité du produit au détriment du rendement.

Ainsi, le charbonnier doit savoir que la teneur en carbone augmente avec la température pendant que le rendement baisse. Cependant, le charbon de bois à usage ménager est essentiellement produit entre 400 et 500°C.

b. Influence de la durée

Les charbonniers de meule affirment que le rendement est considérablement amélioré en allongeant la durée de carbonisation.

Dans la pratique, le charbon de bois issu d'une carbonisation rapide est moins dense et beaucoup plus friable. Par conséquent, la partie non commercialisée est très importante. Toutefois, notons qu'une durée importante de la carbonisation induit des contraintes de présence pour le carbonisateur (surveillance) et peut provoquer des problèmes de conduite.

c). Influence de la matière première utilisée

Toutes les essences de bois peuvent être carbonisées. Cependant, un bois dense donnera un charbon dense alors qu'un bois léger donnera un charbon de faible densité.

Ainsi, une charge de bois homogène en essence et même en dimensions favorise une carbonisation homogène de la charge.

Quant à la teneur en eau, retenons que plus le bois utilisé sera humide, plus l'énergie nécessaire à l'évaporation sera importante et plus le taux de matières carbonisables sera faible.

d). Influence des conditions météorologiques

La pluie et un vent fort peuvent gêner considérablement le processus de carbonisation (notamment pour les meules et les fosses). Lorsque le vent est très fort, le côté au vent carbonise beaucoup plus rapidement ; il y a même un risque élevé de coup de feu. La pluie augmente le temps de carbonisation alors que de mauvaises conditions atmosphériques font le plus souvent baisser le rendement.

3.2.2.4. Caractéristiques du charbon

Les auteurs ne sont pas encore unanimes sur la formule chimique du charbon de bois. Toutefois, il est évident que le charbon est principalement constitué par du carbone accompagné des matières minérales du bois et de composés volatiles en quantité plus ou moins importante.

Quant aux caractéristiques physiques, notons que le charbon de bois a une masse spécifique variant de 0,2 à 0,6 t/m^3.

La reprise d'humidité du charbon est relativement faible (entre 3 à 10 %). Son pouvoir calorifique est fortement lié au taux de carbone fixe (donc de la température de carbonisation). Il varie de 6 500 à 8 000 kcal/kg. Sa chaleur spécifique est de 0,2 à 0,3 cal/g

Enfin, la température d'inflammation du charbon de bois est assez basse et son pouvoir rayonnant élevé.

Pour ce faire, des précautions devront être prises pour son stockage.

En somme, ne perdons pas de vue que la carbonisation n'est qu'une étape d'une longue filière.

La filière charbon de bois est constituée d'un ensemble de phases :

- Production de bois
- Collecte
- Séchage et conditionnement du bois en vue de la carbonisation
- Fabrication
- Ensachage et transport vers un dépôt on un point de distribution
- Commercialisation
- Utilisation

La fabrication proprement dite du charbon ne représente qu'un maillon - certes très important - de la chaine.

3.3. Reboisement

L'élimination du bois dans la retenue du barrage de Kompienga s'impose, et, dans le contexte de la lutte contre la désertification, il est impérieux de valoriser cette masse ligneuse.

Cependant, par cette opération bien justifiée, on contribue à la régression de l'espace forestier naturel.

Pour compenser cette masse ligneuse "récoltée" dans la future zone inondée, il faudrait reboiser la zone de marnage et reconstituer une parcelle à peu près correspondante à la superficie sauvée.

Ainsi, on pourrait envisager un cordon arboré de 50 à 80 m de large pour la zone de marnage. Les essences supportant l'eau stagnante pendant une certaine période sont rares.

On pourra expérimenter l'acacia nilotica avec d'autres essences.

6. CHOIX D'UNE OPTION

6.1. Raisons du choix de la variante 2

Le choix de la variante 2 est fortement lié aux avantages qu'offre le charbon de bois. En effet, alors que le bois se détériore très vite (champignons - insectes) sous le climat tropical et en particulier en saison des pluies, le charbon de bois, par contre, a des avantages évidents en zone urbaine :

- Il est moins cher à transporter
- Il ne se détériore pas pendant le stockage
- Il contient plus d'énergie pour le même poids que le bois
- Il a besoin de moins d'espace de stockage
- Il pollue moins, ne doit pas être découpé et peut être utilisé dans des petits fourneaux relativement efficaces et pas chers.

Mais, en prenant en compte les pertes énergétiques nécessaires à sa fabrication, le charbon de bois n'est pas, à priori, la solution a un problème énergétique domestique.

En effet :

1 kg de bois sec ⟶ dégage par combustion 16 800 KJ (≃ 4 000 Kcal)

↓

produit 0,300 kg de charbon de bois qui dégage environ 9 500 KJ (≃ 2 250 Kcal) par combustion

On a donc perdu 7 300 KJ, soit près de 45 % du pouvoir calorifique du kilogramme de bois initial. C'est une aberration, pourrait-on s'exclamer.

Pourtant, en n'envisageant pas les conséquences de la déforestation éventuelle, le transport du charbon de bois, à partir d'une certaine distance, est plus économique que celui du bois. Pour preuve :

- 1 kg de bois "sec" (20 % d'humidité) dégage par combustion

environ 16 800 kJ

- 1 kg de charbon de bois dégage environ 31 500 KJ.

Ainsi, en transportant 1 kg de charbon de bois, on dispose de deux fois (presque) plus de "calories potentielles" qu'en transportant 1 kg de bois.

Le tableau qui suit traduit la part relative du coût de transport sur le coût total en fonction de la distance pour 10^7 Kcal :

Distance	km	10	30	50	70	90	110	130
10^7 Kcal bois	%	43	71	81	86	88	90	92
10^7 Kcal charbon de bois	%	9	19	27	34	40	45	49

Donc, même si la calorie charbon de bois est plus coûteuse à produire que la calorie bois, elle peut, à partir d'une certaine distance, s'avérer plus économique.

On peut à présent affirmer que la transformation du charbon de bois est la variante la plus fiable (variante 2). En effet, Kompienga est à 370 km de Ouagadougou, alors qu'au delà de 95 km du lieu de production, il est plus "rentable" d'utiliser du charbon de bois (cf. Abrégé de carbonisation artisanale p.6).

Avec la carbonisation sur place qui entraîne une réduction du volume de la biomasse, les coûts de débardage et de transport diminuent considérablement.

D'une manière générale, c'est la contrainte de temps (mise en eau en Juin 1988) qui détermine le déploiement lourd de moyens. Avec plus de temps, une diminution considérable des coûts aurait été possible.

La variante 2 constitue donc un optimum au niveau du chantier, du transport et du marché (cf. chapitre 4).

6.2. Système d'exploitation

6.2.1. Modèles de fours retenus

Le choix des types de fours nous est dicté à la fois par le niveau de développement du Burkina Faso et surtout par la masse de matière ligneuse en présence.

Ainsi, nous avions opté pour les systèmes de type artisanal qui, en général, sont à carbonisation par combustion partielle.

En effet, la combustion d'une partie de la charge de bois à carboniser fournit la chaleur nécessaire à la carbonisation, réduisant d'autant le rendement en charbon de bois.

Partant de l'expérience acquise à travers le projet "IDA" à Bobo et l'expérimentation en carbonisation à Wayen (I.B.E. : Institut Burkinabè de l'Energie), nous proposons en priorité la meule casamançaise. Toutefois, on installera un four en briques près de la scierie. Découvrons alors les caractéristiques essentielles de ces deux procédés de carbonisation.

6.2.1.1. Meule casamançaise

La meule est l'un des procédés de carbonisation les plus anciens. La meule casamançaise, de forme hémisphérique, est née de l'amélioration de la meule traditionnelle sénégalaise.

Dans la mesure du possible, le site de la meule devra être bien abrité du vent, le terrain devra être plat et non spongieux pour éviter le ruissellement des eaux et un sol trop humide. Ces conditions réunies, on pourra maintenant construire la meule casamançaise.

En premier, on installe le plancher de la meule qui joue un rôle important car assurant son aération.

Il est composé de deux couches de moyens et petits bois. Pour la première couche, les bois de diamètre 15 à 20 cm sont disposés radicalement tout autour du point central de la base. Les bois de la seconde couche de 5 à 7 cm de diamètre sont disposés tangentiellement

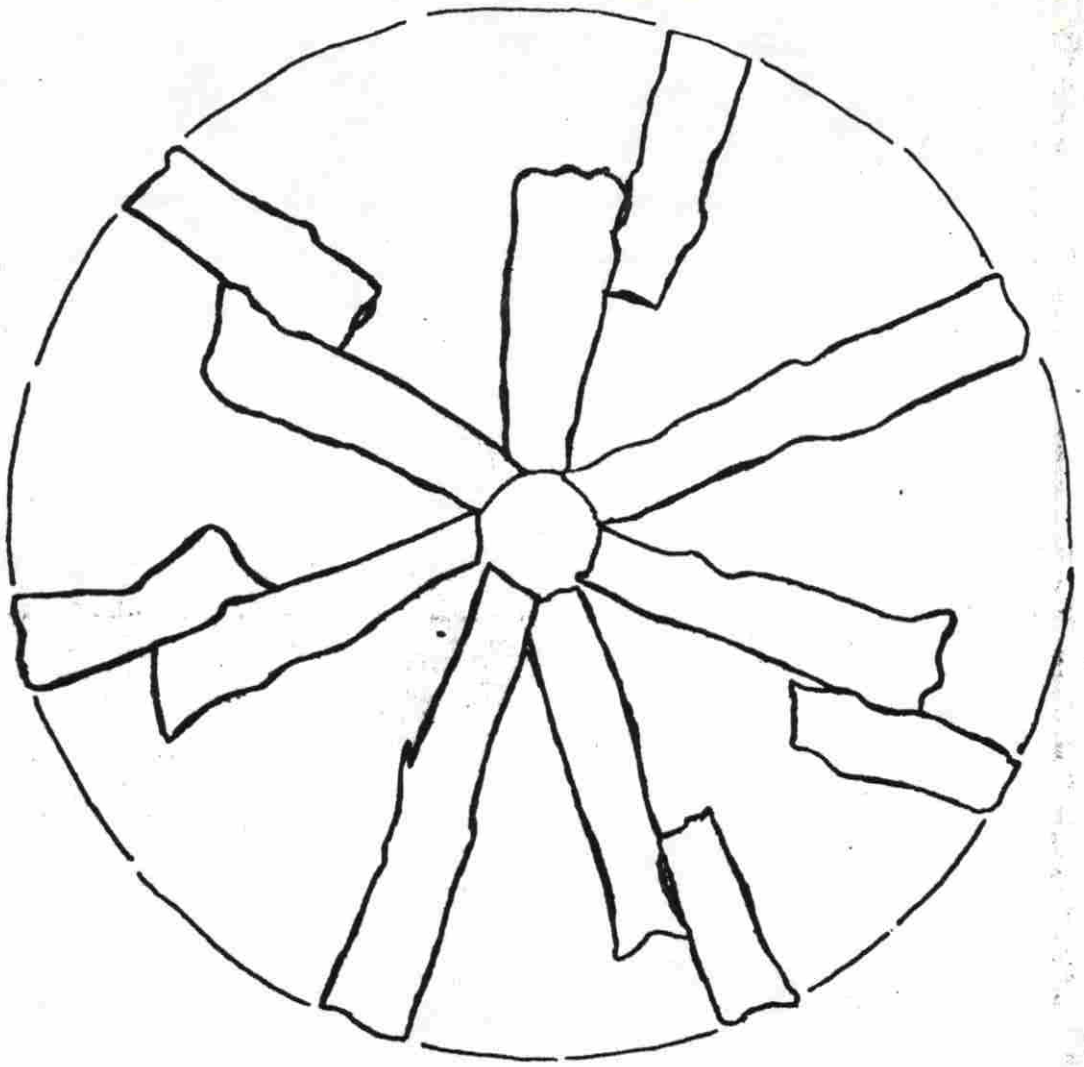


figure nº 4 DÉBUT DU PLANCHER DE LA MEULE CASAMANÇAISE

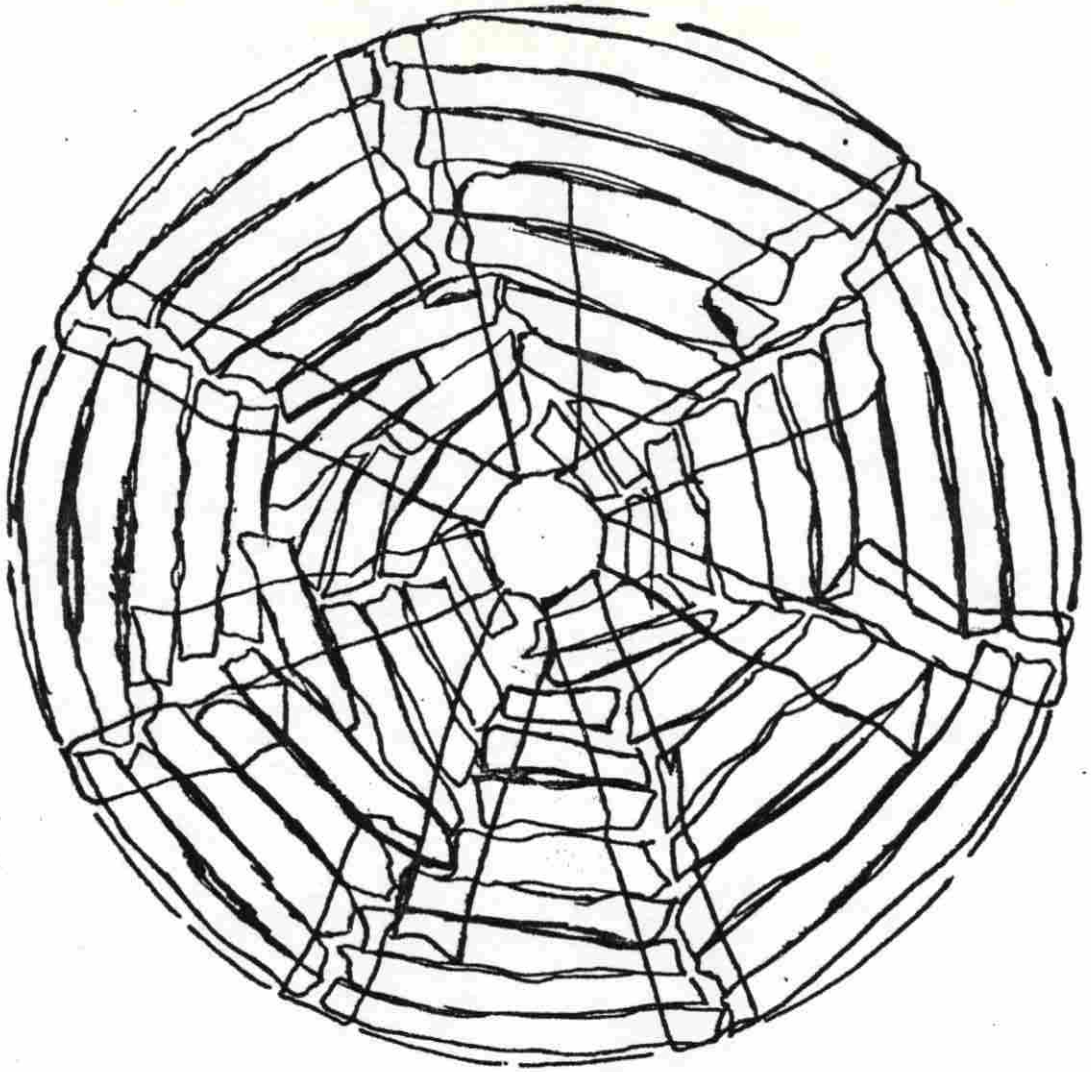


figure n°5 PLANCHER COMPLET DE LA MEULE CASAMANÇAISE

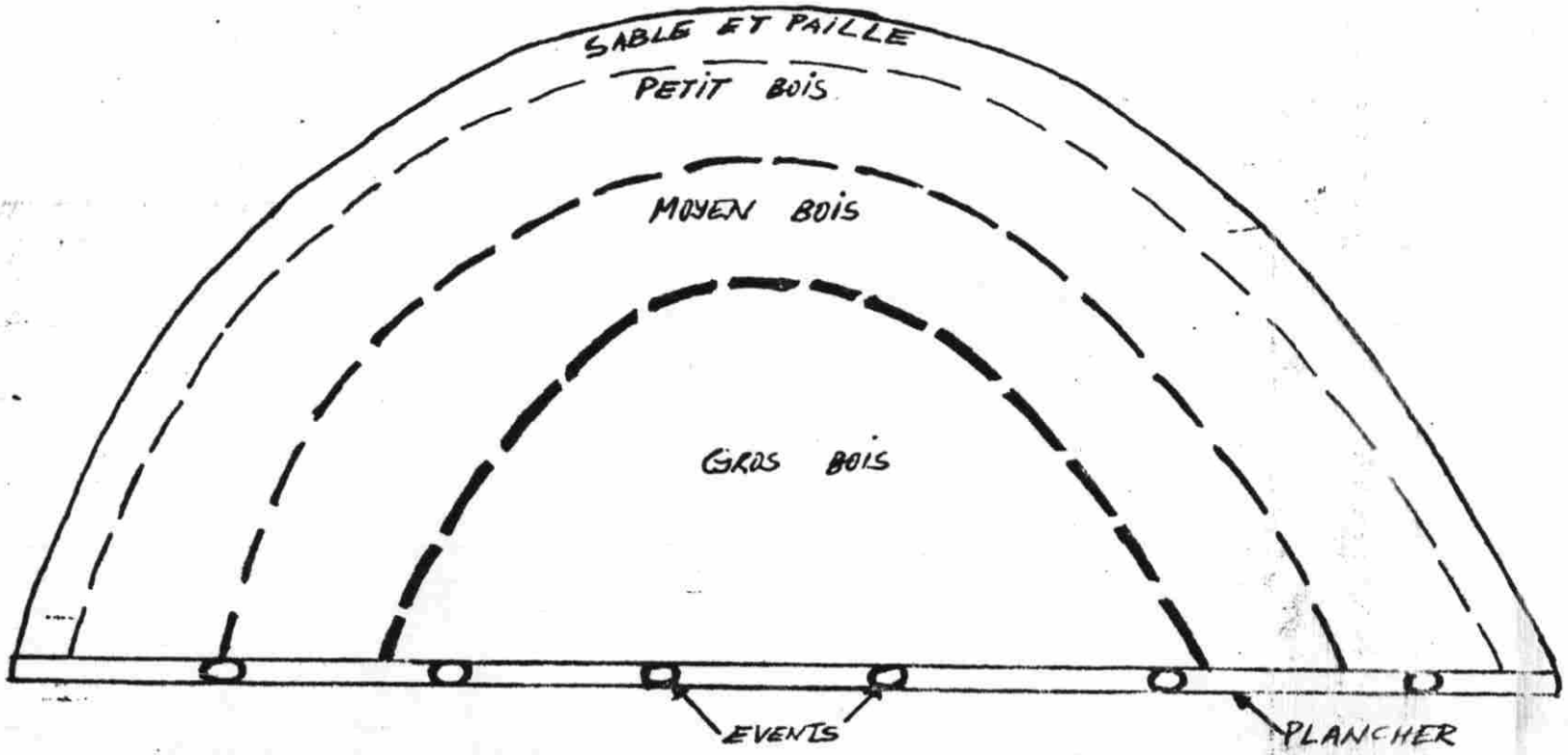


figure n°6 PROCESSUS DE MONTAGE (SCHEMA)

à ceux de la première couche (cf. figure n° 4 et n° 5).

Le plancher achevé, on range le bois à carboniser en assise verticale tout en ménageant une cheminée centrale qui sera remplie de matières inflammables. Les couches successives de gros bois diamètre de l'ordre de 40 cm sont disposées jusqu'à environ 50 cm des extrémités du plancher.

Les bois de diamètre compris entre 20 et 40 cm donnent à la meule la forme voulue et arrive presque à couvrir entièrement le plancher. La dernière couche est composée essentiellement de petits bois (diamètre inférieur à 20 cm) voir figure n° 6.

Enfin, la meule nue est couverte de paille ou à défaut d'herbes et d'arbustes, puis de sable. On prend soin de ne pas boucher la cheminée centrale d'où l'on allumera la meule. La seconde cheminée constituée de trois fûts de 220 l soudés, est placée à l'endroit qui lui est réservé lors du montage. C'est cette dernière cheminée qui servira après la mise à feu.

Notons que les dimensions du plancher varient suivant le nombre de stères utilisés. Ainsi, le plancher mesurera 3 m, 4m ou 5 m de rayon respectivement pour 30, 50 ou 100 stères.

Pour fabriquer la cheminée, on a soudé 3 fûts dont les fonds ont été conservés, en ne gardant fixé au fût qu'une largeur de 15 cm pour former une chicane (cf. figure n° 9).

Les chicanes refroidissent les gaz en les conduisant dans le fond de la cheminée où une petite ouverture permet la récupération des pyroligneux. Cette cheminée qu'on déplace autour de la meule, active l'aération de la meule et diminue la durée de la carbonisation.

En somme, ce procédé est le plus économique en matériau. C'est pourtant celui dont la conduite est la plus délicate et demande des opérateurs qualifiés.

En effet, la mise à feu de la meule implique une présence permanente d'une équipe de 3 personnes jusqu'à la fin de la carbonisation.

Voyons alors les importantes étapes de la conduite d'une meule

casamançaise

. L'allumage de la meule se fait par le trou central en y jetant des braises

. Après une bonne prise (15 à 20 mn), boucher le trou central

. Ouvrir les trous d'aération tous les 3 à 4 m autour de la base de la meule. Ne jamais faire un trou à côté de la cheminée, ceci diminuerait la vitesse de tirage.

. Au cas où les fumées ne sortaient pas par la cheminée, faire un feu de tirage.

. Au fur et à mesure que la carbonisation avance, la meule s'affaisse progressivement et des trous apparaissent qu'il faut boucher immédiatement avec de la paille et du sable.

. Déplacer la cheminée si le côté où elle est située s'est déjà carbonisé.

. La fin de la carbonisation s'amorce par une forte diminution des fumées qui tirent vers le bleu. A partir de ce moment, c'est le charbon qui brûle d'où la nécessité de retirer la cheminée et fermer hermétiquement la meule pour la phase de refroidissement.

Durant cette phase, chaque équipe doit commencer le montage de la meule suivante.

. On commencera le défournement lorsque la température de la meule sera inférieure à 50°C. Il se fait à l'aide de râteaux en commençant par la base de la meule. Refermer celle-ci aussitôt une partie du charbon déterré et continuer ainsi jusqu'à à la fin de l'opération.

. Couvrir le charbon défourné de sable et éviter de déprécier sa qualité en faisant l'extinction par eau.

. Mettre le charbon dans des sacs en évitant d'y ajouter des incuits.

. Coudre les sacs avec du fil en l'étiquetant. On y verra le numéro de la meule et le poids du sac.

Par ailleurs, notons que la meule casamançaise obéit au tirage inversé c'est à dire que l'air continue à arriver par le bas des évents, mais les gaz chauds au lieu de s'échappent par le sommet (tirage direct) sont évacués par la cheminée située à la base du four. Les produits solides résultants de la carbonisation sont classés

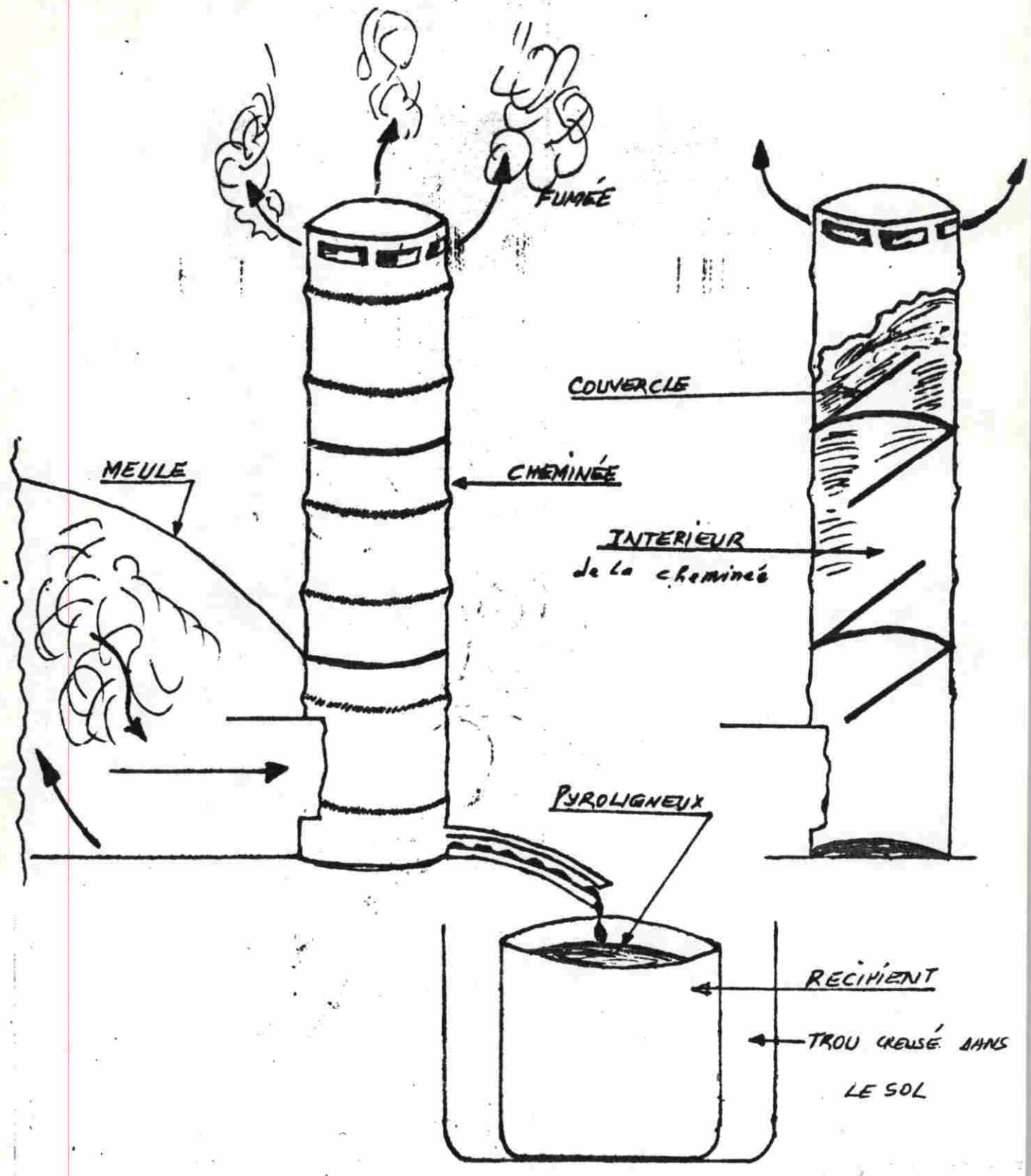


figure n°9 MEULE AVEC CHEMINÉE

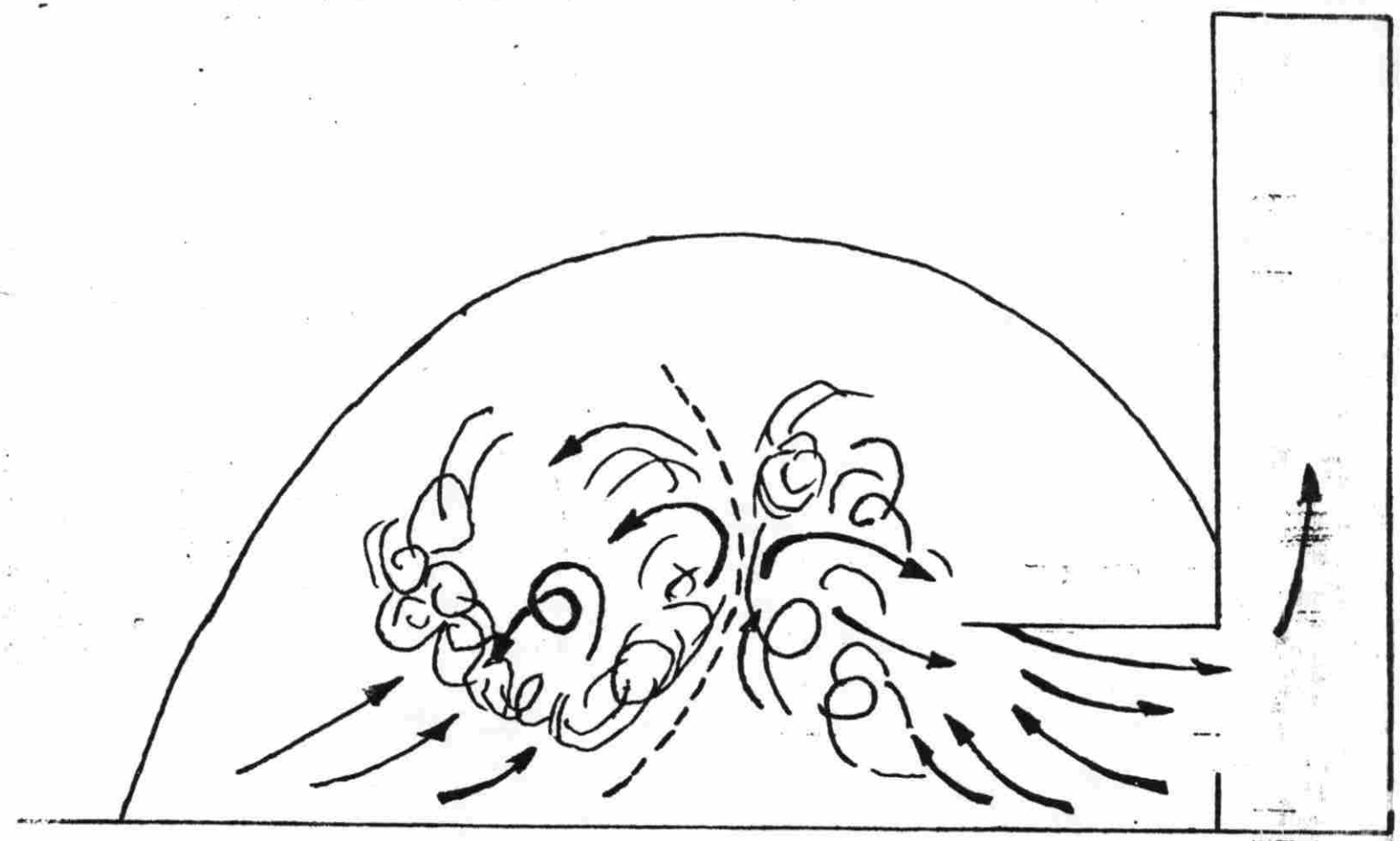


figure n°8 MOUVEMENT DES GAZ DANS LA MEULE CASAMANÇAISE

(REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE)

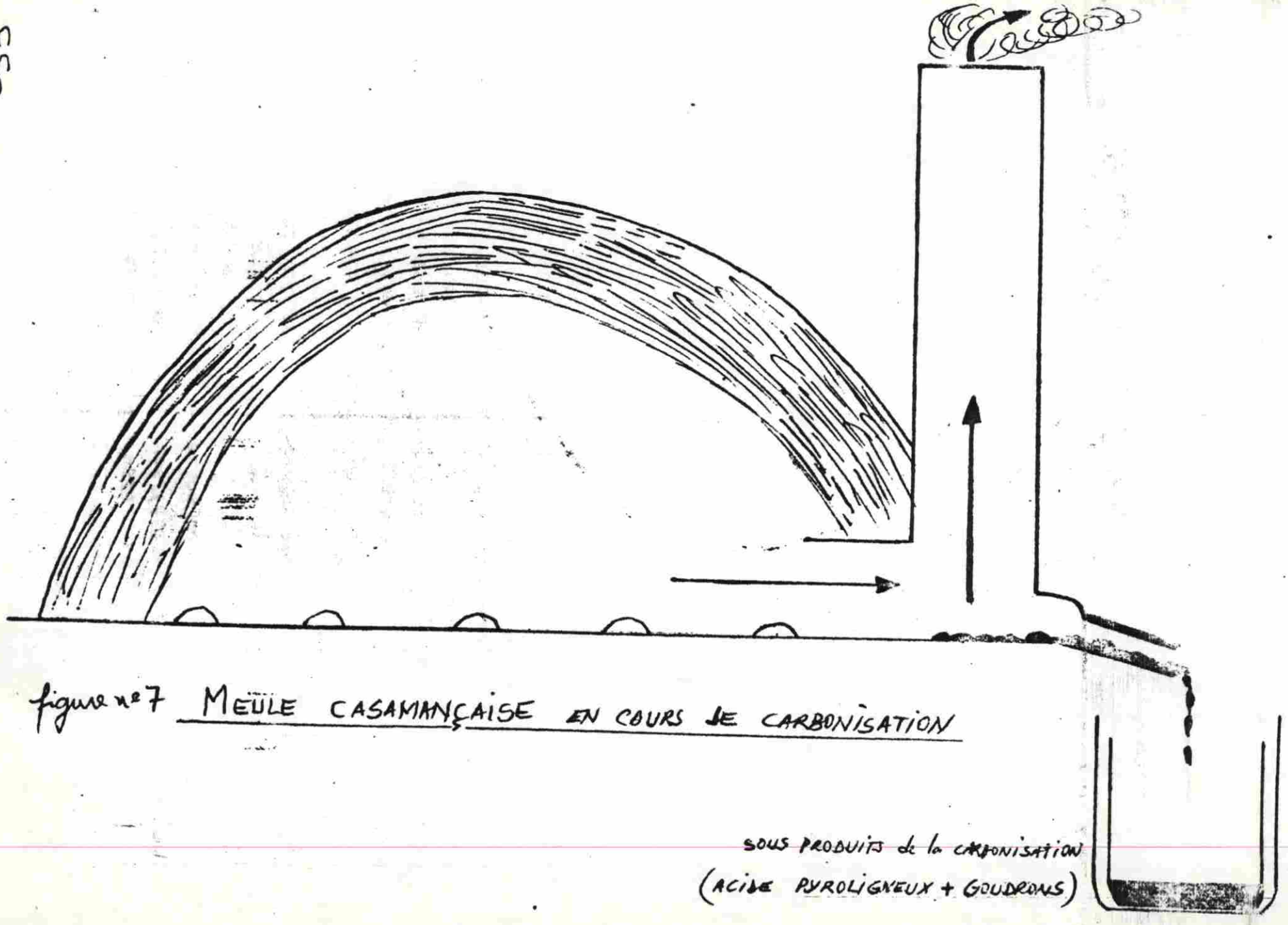


figure n°7 MEULE CASAMANÇAISE EN COURS DE CARBONISATION

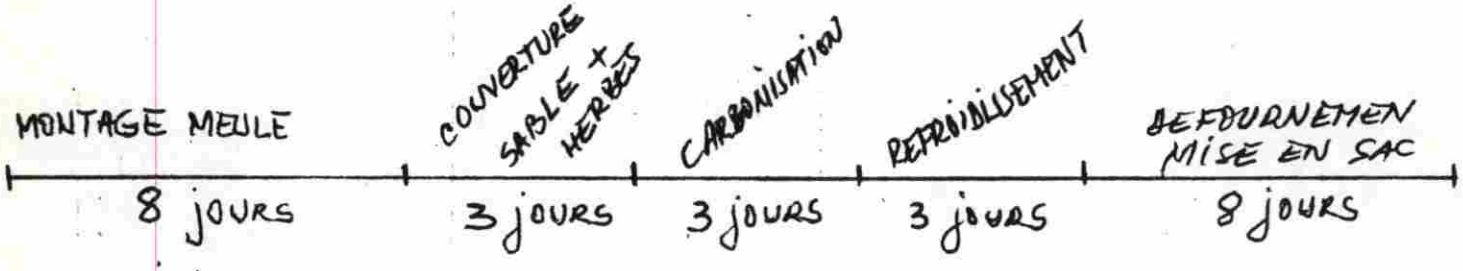
selon trois critères : les incuits, les morceaux de dimension inférieure à 25 mm et ceux de dimension supérieure à 25 mm. Les incuits sont des pièces de bois partiellement carbonisées. On les reconnait par leur densité (plus lourds) leur faible friabilité et parfois même leur couleur marron, plus ou moins foncé, c'est le bois torréfié.

Un tamis permettra de séparer la part commercialisable du charbon, du poussier et des morceaux de dimension inférieure à 25 mm.

A cet effet, on tâchera de minimiser le nombre des manipulations. Par ailleurs, ne perdons point de vue que le charbon peut s'enflammer spontanément : il faut donc l'emmagasiner dans un local bien ventilé. Son grand pouvoir d'absorption de l'eau implique certaines précautions, tant pendant le stockage que pendant le transport.

D'après les résultats du département de carbonisation au Sénégal, la meule casamançaise a un rendement de 24 %. Ainsi, pour assurer la fourniture de 140.000 t de charbon, il fallait 583 000 t de bois. Alors qu'avec la meule traditionnelle de rendement 16 %, il fallait 875 000 t. Ainsi avec la meule casamançaise, on réduisait d'environ 300 000 t la consommation en bois, ce qui pouvait retarder l'appauvrissement du couvert forestier.

Quant à l'organisation du travail, elle se présente de la façon suivante pour une équipe de trois charbonniers.



Au total, la meule casamançaise est bien adaptée à des sites bien fournis avec des dimensions de bois variées (gros-moyen-petit bois) et se prête pour la zone galerie et savane arborée.

6.2.1.2. Le four en briques

Il existe dans le monde plusieurs sortes de fours maçonnés. Nous présentons ici le type brésilien qui est une construction maçonnée cylindrique couverte d'un dôme.

La paroi verticale est percée d'une porte qui permet le chargement en bois et le défournement du charbon. A la base une double rangée d'évents est percée sur toute la périphérie ; une cheminée est également ménagée au sommet du dôme.

L'enceinte est réalisée en briques cuites pleines liées par un mortier composé d'une partie de chaux pour trois parties de sable.

La construction du four commence par le coulage d'une dalle armée d'un grillage, d'un diamètre légèrement supérieur à celui du four, le plan est légèrement incliné vers la porte pour favoriser l'écoulement des jus pyroligneux.

La partie cylindrique est ensuite montée, les briques posées à plat suivant leur longueur.

Les briques qui constituent le dôme sont obligatoirement assemblées sur un moule constitué en l'occurence d'un chassis de bois recouvert de contreplaqué. On laisse une couverture au sommet du dôme. Elle servira de cheminée d'allumage. Le panneau de la porte, composé d'une feuille d'amiante prise en sandwich entre deux tôles, est serré par huit boulons sur un chassis métallique au moment de la fermeture.

Enfin, on applique un crépi de chaux pour renforcer l'étanchéité (cf. figure n° 10).

La capacité du four varie de 12 à 200 m^3. Toutefois, le modèle le plus répandu (au Brésil) est celui de 40 m^3 environ. Ses principales dimensions sont les suivantes :

- hauteur du mur	:	1,80 m
- diamètre intérieur	:	5,00 m
- rayon de courbure de la coupole	:	3,00 m
- dimension de la porte	:	1 m x 1,6 m
- capacité	:	environ 40 m^3

Quant à son principe de fonctionnement, notons qu'une zone très chaude de combustion doit être créée au centre de la charge pour amorcer le processus de carbonisation et entretenir les conditions thermiques favorables à son extension.

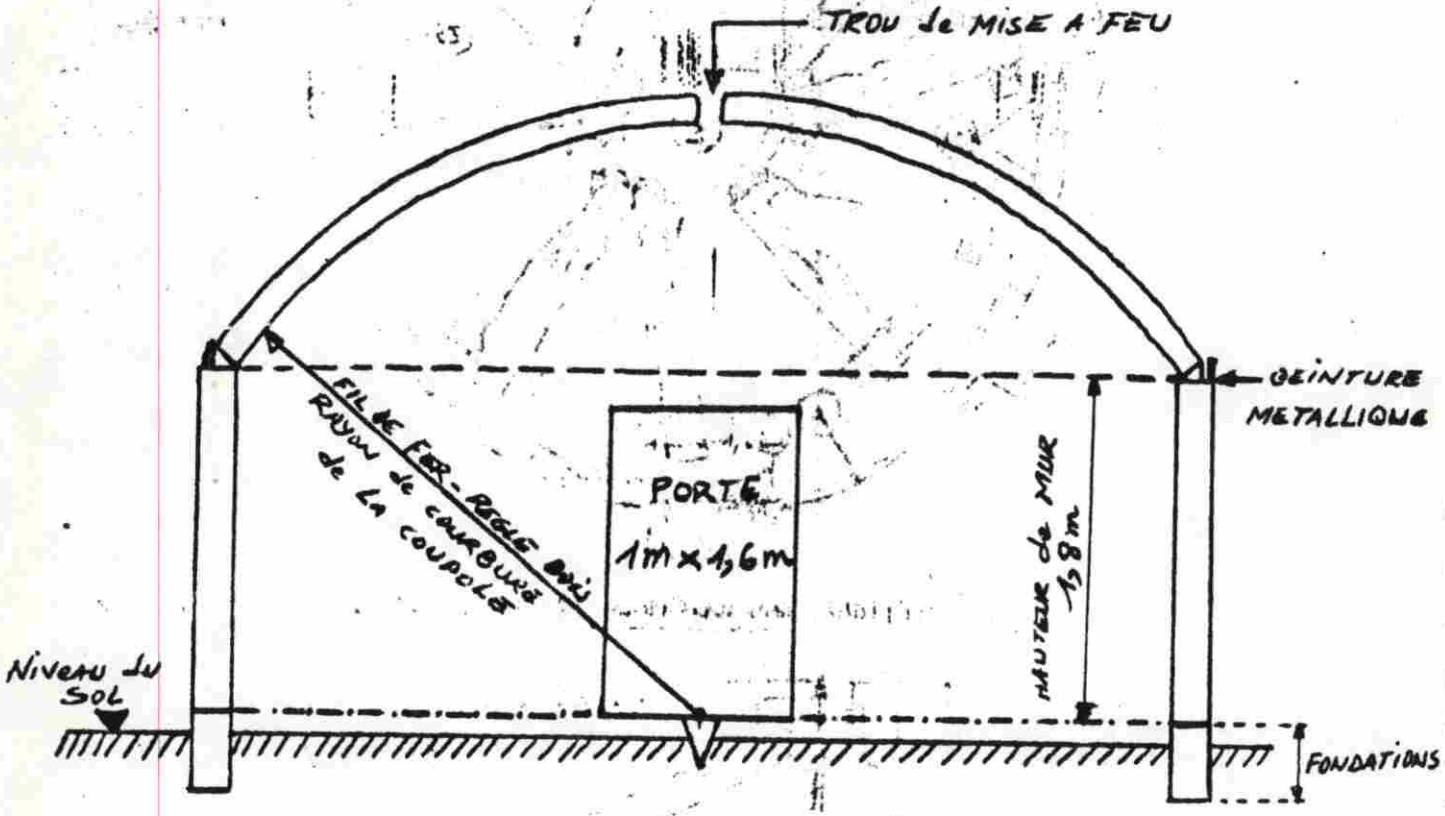


figure n° 10 VUE EN COUPE DU FOUR

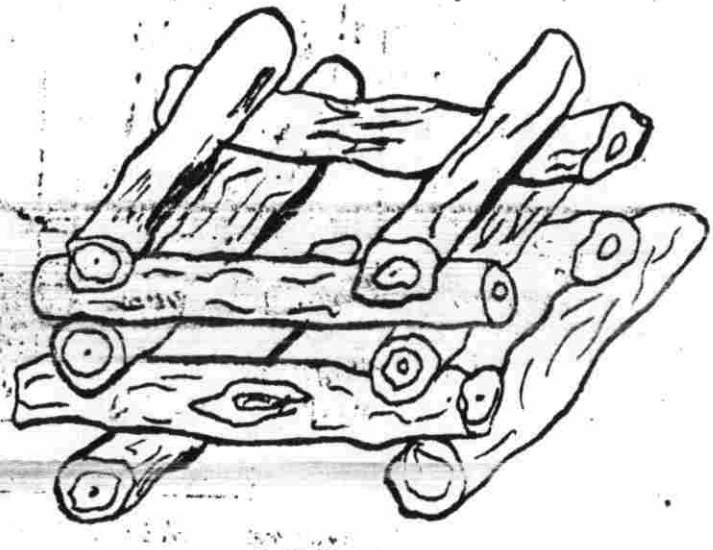


figure n° 11 DISPOSITION DES BUCHES FORMANT LA CHEMINÉE

La montée en température est obtenue par la combustion d'une partie de la charge en tirage direct en même temps que se développe une première zone de carbonisation. Au passage en tirage inversé, ce sont les gaz très chauds accumulés au sommet du four, qui favorisent son extension vers la périphérie et le bas de la charge. (cf. figure n° 13).

Avant d'aborder la mise en oeuvre proprement dite, notons que le four est par prudence, préchauffé quelques heures par la combustion d'une petite charge de bois avant la toute première carbonisation.

Le chargement du four commence par la construction d'une grille de bois constituée par 8 à 10 rondis d'environ 10 cm de diamètre disposés radicalement. Ceci permet aux fluides de circuler à travers le bois chargé sur la grille et de transiter par les évents situés à la base du four. (cf. figure n° 12).

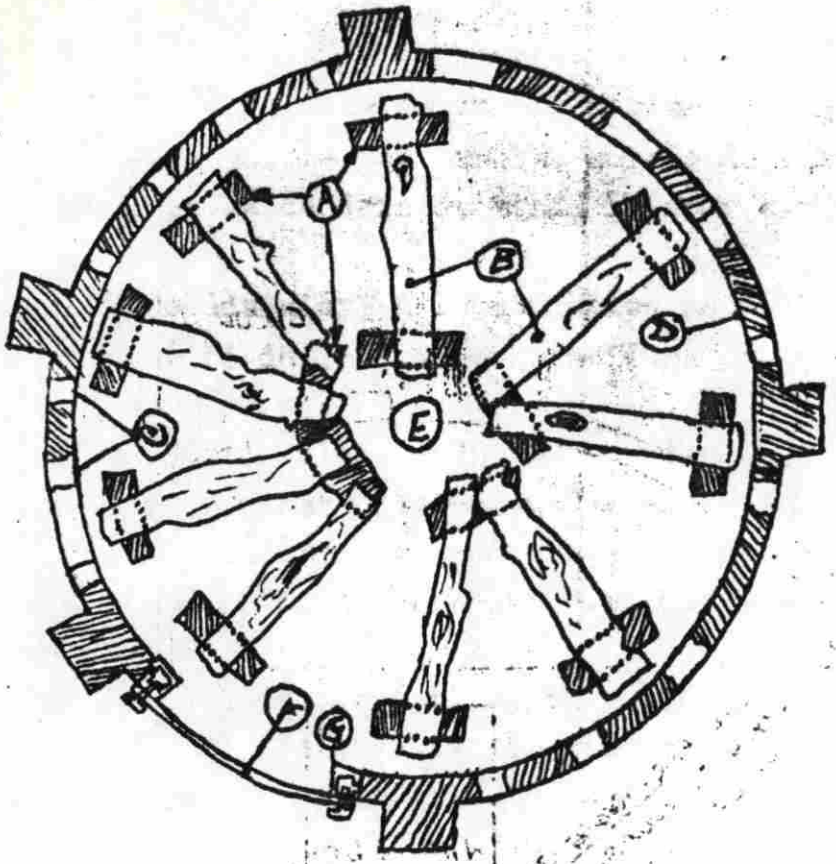
Au cours du chargement, une cheminée remplie de petits bois et d'incuits est menagée au centre du four.

Le rangement vertical, à cause de ses avantages évidents sur le rangement horizontal, est retenu. En effet, il offre une plus grande facilité de chargement et une meilleure circulation des fluides, ce qui permet une meilleure propagation du front de carbonisation (cf. figure n° 13). L'opération terminée, la porte est mise en place.

A présent, découvrons les différentes phases de la conduite de carbonisation du four maçonné brésilien.

Tout d'abord, l'allumage : à ce stade, toutes les ouvertures (évents et dômes) sont ouvertes. Une pelle de braises incandescentes est versée dans la cheminée. Environ une demi-heure après, les fumées sont denses, très chaudes. Le trou d'allumage est alors hermétiquement fermé.

Ensuite la carbonisation commence avec la fermeture de la trappe qui inverse le tirage. Les fumées s'échappent par la rangée d'évents supérieure, tandis que l'air pénètre par la rangée inférieure Une grande part de la conduite consiste à apprécier la couleur et la densité des fumées et, si besoin est, ouvrir ou fermer les évents en conséquence.



A : briques support

B : buches formant la grille

C : Events

D : Paroi du four

E : emplacement cheminée

F : Porte metallique

G : Fers support de Porte

figure n°12 DISPOSITION DES BUCHES FORMANT LA GRILLE ET VUE EN COUPE

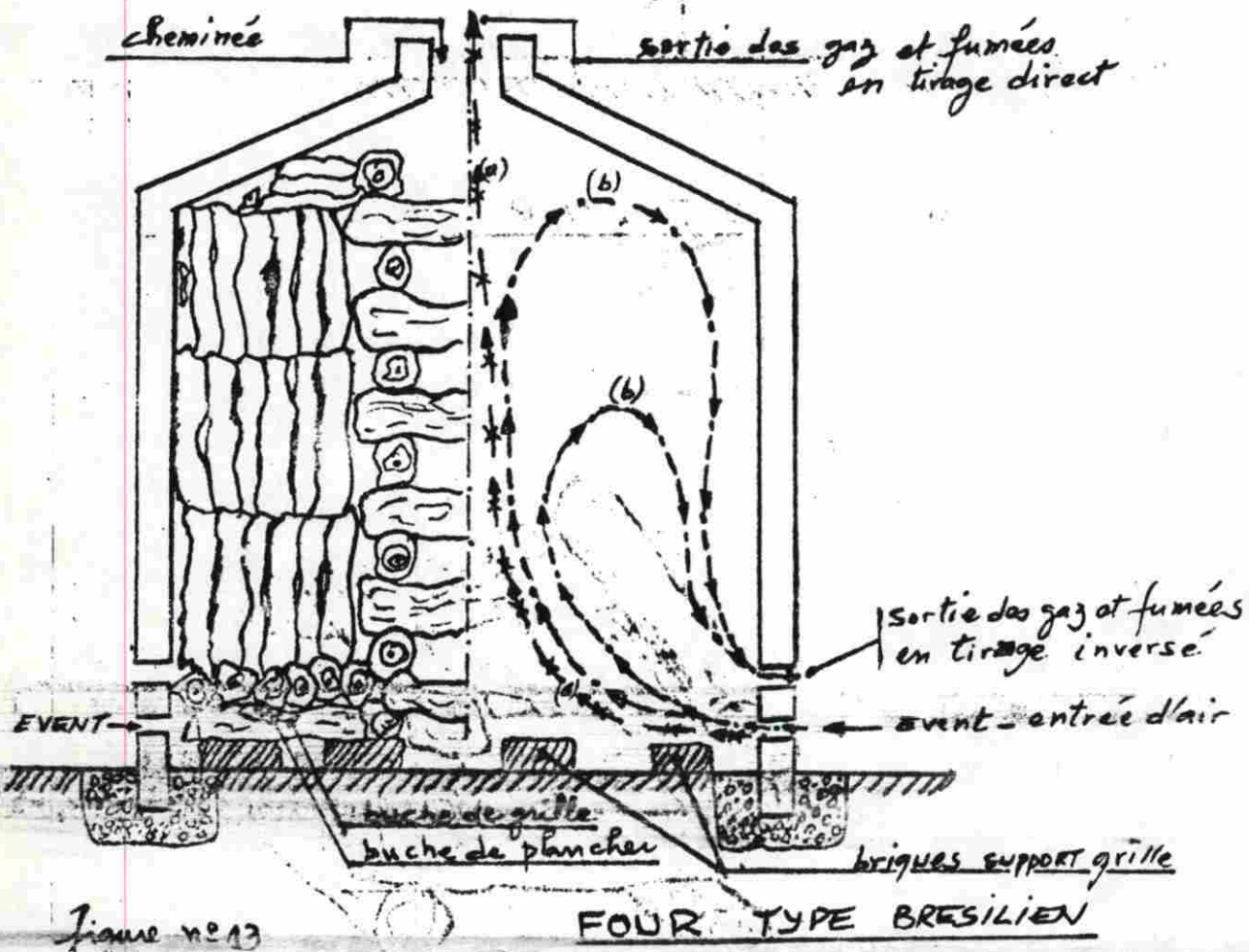


figure n°13 FOUR TYPE BRESILIEN

DEMI-COUPE GAUCHE : disposition du bois et cheminée

DEMI-COUPE DROITE : circulation air/gaz-fumées :

(a) → → → tirage direct

(b) → · - → tirage inversé

En phase terminale de carbonisation, des gaz s'enflamment spontanément à la sortie des évents, suivis de fumées bleues et de chutes de braises. A ce dernier stade le four est éteint.

L'on procède alors à l'obturation hermétique au sable, au besoin l'étanchéité de la trappe supérieure est renforcée.

La projection d'un cordon de mortier sur le périmètre de la porte colmate les fuites qui peuvent se manifester entre le panneau et le chassis. Si des fentes apparaissent sur les parois, on les colmate avec de la barbotine (mélange de chaux et d'eau).

Enfin, le défournement pourra avoir lieu après le refroidissement du four qui dure une quatre-vingtaine d'heures. La porte retirée, le charbon est extrait à la pelle ou à la fourche. Ce travail est assez pénible lorsqu'il faut pénétrer dans le four pour dégager la partie opposée à la porte.

Notons que le rendement pondéral sur anhydre du four brésilien, obtenu avec du chêne vert à 18 % d'humidité sur brut, est de 24%, avec un taux de carbone fixe de 63 à 70 %.

6.2.2. Domaine à exploiter année par année

Le diagramme de remplissage du barrage de la Kompienga fait apparaître qu'au cours de la saison des pluies 1988, le niveau de la retenue va atteindre la côte 165.

Si rien n'était fait jusqu'à cette date, environ 50 % de toute la masse ligneuse sera définitivement inondée. En effet, à cette côte, 6 120 ha seront inondés avec ses 88.600 m^3 de bois disponible.

Ainsi, le temps de remplissage de la cuvette détermine - si l'on tient à la réussite du projet - le rythme de l'exploitation de la masse ligneuse située dans la zone inondable.

Selon les prévisions, le niveau 180 ne sera atteint que 4 à 7 ans après la mise en eau du barrage et bien sûr en fonction de la pluviométrie.

On montre dans le tableau suivant le domaine (minimum) à exploiter année par année :

	Surface (ha)	Volume total m^3	Niveau du plan d'eau (m)
Juin 1988	6.120	88.600	côte 165
Juin 1989	6.000	55.000	côte 174
Juin 1990	5.000	40.000	côte 178
Juin 1991	3.000	15.000	côte 180
Total	20.120	198.600	

Les côtes 174 et 178 ne sont qu'indicatives.

6.2.3. Précautions particulières

De prime abord, les méthodes de récupération du bois de la zone inondable auront un impact sur la vie du barrage de Kompienga et sur les utilisations ultérieures.

En effet, pour garantir la sécurité du barrage et l'avenir de la pisciculture, le terrain devra être laissé propre et les troncs des arbres coupés à environ 20 cm du sol. Il faudra donc éviter de déssoucher les arbres.

Ensuite, le chef du projet devra prendre très au sérieux le problème des feux de brousse dans la région.

Ici, les feux de brousse sont, entre autres, mûs par un esprit de braconnage. Le braconnage est en effet une activité très développée dans la zone, ce qui ne rend point la tâche facile aux forestiers en poste à Pama.

Ce n'est point le dépôt à bois qui est à priori menacé, mais les différents points d'ensterage.

Par ailleurs, l'inondation permanente de la couverture végétale de la retenue de Kompienga pourrait engendrer certains dangers dûs au climat tropical.

En effet, la biomasse se décompose très vite surtout dans les zones de profondeur inférieure. Les eaux s'enrichissent donc rapidement en substances nutritives.

Par conséquent, il se développe une croissance rapide de la faune et de la flore. On pourrait alors s'attendre à une pêche très abondante les premières années.

Mais par cet accroissement, l'oxygène dans les eaux est utilisé de manière extrême. On arrive ainsi à une accélération de la décomposition des substances en milieu anaérobie. La faune nécessitant l'oxygène meurt. Des plantes sans exigences et surtout les algues rouges envahiront les eaux supérieures. L'absence d'échange des eaux profondes par le vent entraînerait une décomposition anaérobie qui mènerait à la production de l'hydrogène sulfuré (H_2 S). A partir de ce moment, toute survie de la faune aquatique, particulièrement les poissons, n'est plus possible. Dans un délai de 5 à 10 ans, ce développement néfaste provoque des maladies chez des riverains ayant consommé cette eau déjà pourrie.

Pour conclure, notons que nous avons exprès poussé à l'extrême les cas défavorables afin qu'on saisisse mieux la nécessité de laisser la superficie de la cuvette bien propre.

Dans le cas particulier de la Kompienga, on prévoit le brûlage des ramilles et autres déchets après la récupération du bois.

Cette précaution est suffisante bien que les éléments favorables à l'eutrophisation se retrouvent dans les cendres.

En effet, la biomasse restante constituée des débris de bois est très négligeable et donc ne présente aucun danger devant cette grande masse d'eau (2 km^3 à la côte 180).

6.3. Mesures d'accompagnement à réaliser par le gouvernement

Le succès du projet "Valorisation du bois de la Kompienga"

dépend :

- de l'efficacité de l'organisation, du travail sur le chantier et d'un système de transport sans friction
- de la situation du marché des produits ligneux.

La variante 2 constitue un optimum au niveau du chantier, du transport et du marché.

Pour réaliser cet optimum, il faudrait que le gouvernement prenne quelques mesures d'accompagnement.

En effet, pour éviter la surproduction et partant garantir les prix officiels il faudrait :

- réduire le volume de bois arrivant à Ouagadougou d'autres destinations. Cette décision entraînerait une diminution des permis de coupe dans les régions particulièrement menacées par la désertification.

- Déplacer les charbonniers des environs de Ouagadougou et de Niamey vers Kompienga pour qu'ils profitent à la fois de la formation en technique améliorée de carbonisation et du bois déjà abattu là pour le déboisement.

La justification de cette décision réside dans le fait qu'on n'a pas l'ambition d'étendre la consommation de charbon de bois mais plutôt de remplacer le volume existant.

La production en charbon de bois de Kompienga étant suffisante à couvrir tous les besoins du marché de Ouagadougou, le projet doit être pendant quatre ans la seule source d'approvisionnement de charbon de bois.

Dans cet ordre d'idées, une enveloppe financière pourrait être prévue pour le contrôle et le suivi de ces dispositions.

Au terme de ce chapitre, signalons la possibilité d'utiliser le fond du lac à des fins de transport. En effet, avec une barge, on pourrait désenclaver la rive droite lors de l'inondation et partant assurer l'évacuation des produits ligneux au cas où le retard dans