



Photo Delwaulle.

Fabrication de charbon de bois à Niamey (Niger). Constitution d'une meule.

LA CARBONISATION DES BOIS TROPICAUX

« Essais de laboratoire et perspectives industrielles »

par J. DOAT et G. PETROFF

Division Cellulose et Chimie du Centre Technique Forestier Tropical.

SUMMARY

THE CARBONISATION OF TROPICAL WOODS : LABORATORY TESTS AND INDUSTRIAL PROSPECTS

This article takes stock of the possibilities of carbonisation of tropical woods.

After a general account of the pyrolysis of woods and the products of pyrogenation, some results are given of laboratory experiments on more than a hundred tropical species. A high correlation was observed between the density of the wood and the density of the resulting charcoal.

Problems relating to the production of wood charcoal for use as a reducing agent in metallurgy and the production of electric energy from wood gases are also dealt with. These two possibilities are undoubtedly interesting for developing countries.

The former is interesting for the possible setting up of a steel industry in regions possessing deposits of metals but no coal deposits.

The latter is interesting for the production of low-cost energy from local woods, as a substitute for petroleum imported at high cost.

Other uses can also be envisaged.

RESUMEN

LA CARBONIZACION DE LAS MADERAS TROPICALES ENSAYO DE LABORATORIO Y PERSPECTIVAS INDUSTRIALES

El propósito de este artículo consiste en presentar el estado actual de las posibilidades de carbonización de las maderas tropicales.

Tras una descripción general acerca de la pirólisis de las maderas y de los productos obtenidos por pirogenación, se dan algunos resultados registrados a escala de laboratorio sobre más de 100 especies tropicales. Se ha observado una correlación de elevado nivel entre la densidad de las maderas y aquella de los carbones obtenidos.

Los problemas relativos a la producción de carbón de madera utilizable como reductor en metalurgia y, asimismo, la producción de energía eléctrica a partir de los gases de madera, han sido también examinados. Ambas posibilidades presentan un interés indiscutible para los países en vías de desarrollo, a saber :

— la primera, para la creación de una industria siderúrgica en las regiones que poseen yacimientos metálicos, pero que no disponen de carbón,

— la segunda, para la producción de energía en condiciones económicas mediante maderas locales, en sustitución del petróleo importado y de precio de costo elevado.

Pueden también ser vislumbradas diversas utilizaciones.

INTRODUCTION

L'utilisation des bois à des fins industrielles a considérablement évolué au cours des dernières décennies en fonction de données techniques, géographiques et économiques.

Les progrès techniques ont généralement été à l'encontre du développement forestier car ils ont avantagé les concurrents du bois, en particulier les produits de synthèse dérivés de la houille puis du pétrole.

Les données géographiques ont conduit l'industrie des bois à se concentrer plus particulièrement dans les pays riches en forêts, actuellement Scandinavie, Canada et certaines parties des Etats-Unis, demain Sibérie et zone tropicale.

Après la première guerre mondiale, les conditions économiques ont fait régresser le bois en tant que source d'énergie au profit du pétrole disponible à un prix avantageux.

La récente crise de l'énergie due aux problèmes d'approvisionnement en pétrole brut et à l'augmentation de près de 400 % de son prix, remet en question les équilibres établis et revalorise dans une certaine mesure des matières premières quelque peu délaissées dont le bois.

Il a donc semblé intéressant de résumer dans cet article nos connaissances sur les problèmes de carbonisation, de rappeler les principaux résultats obtenus au C. T. F. T. à partir d'essences tropicales, de préciser l'importance que pourrait présenter dans les pays tropicaux le charbon de bois obtenu à partir des forêts naturelles ou à partir d'essences de plantation, enfin d'examiner d'un point de vue général les perspectives d'utilisation du bois comme source d'énergie, dans l'économie mondiale.

GÉNÉRALITÉS SUR LA CARBONISATION DES BOIS

Situation actuelle

La fabrication de charbon de bois est connue depuis longtemps dans le monde. Ce fut tout d'abord l'apanage de charbonniers puis de petites entreprises qui ne tiraient qu'un profit limité de la forêt car elles ne pouvaient éviter un certain gaspillage énergétique. Actuellement, ce type de production existe encore dans de nombreux pays du tiers monde qui utilisent du charbon de bois pour la cuisson des aliments ou le chauffage domestique.

Au cours de la dernière guerre mondiale, de nombreux techniciens européens consacrèrent une partie de leur activité à l'étude de la carbonisation. Les buts poursuivis étaient multiples : fourniture à l'industrie chimique de matières premières, production de charbon pour gazogènes, synthèse de carburants. Ces études furent plus ou moins abandonnées après 1945 et l'économie mondiale se tourna vers le pétrole.

Sur le plan industriel quelques pays privés de houille et éloignés des centres de production, tels le Brésil et l'Australie, s'intéressent encore à la carbonisation et produisent du charbon de bois destiné au traitement de minerais dans les hauts fourneaux.

Sur le plan de la consommation courante, la vogue des « barbecues » et autres cuisines champêtres, fait qu'une petite quantité de charbon de bois à usage domestique est à nouveau utilisé dans les pays à haut degré de développement.

Définition de la carbonisation.

La carbonisation consiste à chauffer à l'abri de l'air, une matière première, le bois en l'occurrence, jusqu'à sa décomposition partielle. Le résultat de ce traitement est l'obtention, d'une part, de **charbon de bois**, d'autre part de produits volatils, condensables ou non, appelés **produits de distillation du bois**. C'est pourquoi l'on emploie, pour le même processus chimique, deux termes équivalents : « carbonisation » quand on veut mettre l'accent sur la production de charbon ou « distillation » si la récupération des produits chimiques représente un facteur économique important de la fabrication.

Matière première.

Le bois, sous toutes ses formes à l'exception de la sciure, peut être utilisé pour la fabrication de charbon, en particulier le charbon à usage domestique pour lequel on demande seulement une bonne

inflammabilité et un dégagement de fumée peu important. Pour la production de charbon plus élaboré, type charbon métallurgique, on a intérêt à sélectionner des bois denses et à éliminer les déchets, les souches, les petites branches, etc... Dans ce cas, les rondins représentent une matière première intéressante et l'écorçage du bois améliore la qualité du charbon résultant. De même il est préférable d'effectuer la carbonisation sur des bois secs à l'air. Enfin les bois attaqués par les champignons ou moisissures donnent des rendements inférieurs en charbon et produits de distillation.

La **composition élémentaire** du bois varie peu avec les espèces, ainsi on peut admettre que le bois anhydre contient en moyenne : 49 à 50 % de carbone, 6 % d'hydrogène, 44 % d'oxygène et 0,1 à 0,5 % d'azote. Toutefois, selon la nature de l'essence ou son lieu de récolte, les bois ont des teneurs variables en matières minérales (calcium, magnésium, sodium, potassium, fer, silice, phosphore, soufre, etc...). Le taux et la composition des cendres ont une certaine importance car les matières minérales se retrouvent en presque totalité dans le charbon.

Si la composition élémentaire du bois est sensiblement constante, il n'en est pas de même des **constituants chimiques** qui sont les suivants :

- 1 — lignine : 22 à 40 %,
- 2 — cellulose : 30 à 50 %,
- 3 — pentosanes : 9 à 28 %,
- 4 — mannanes et galactanes : 0 à 12 %,
- 5 — produits extractibles : 0,2 à 20 %. Ces produits extractibles sont constitués par des résines, des oléorésines, des gommes, des cires, des graisses, des huiles, etc...

La composition chimique du bois influe sur les rendements en acide acétique fourni principalement par la cellulose et les pentosanes et en méthanol fourni par la lignine.

Evolution de la carbonisation ou distillation sèche du bois.

Par élévation de la température, on constate les phénomènes suivants (p. 58) correspondant aux différentes périodes de la carbonisation.

Notons que vers 270°-280°, c'est-à-dire au début de la phase 3, commence une réaction exothermique dégageant environ 210 cal. par kg de bois. La carbonisation se déroule donc à ce stade sans apport de chaleur. Cette phase de réaction exothermique doit d'ailleurs être contrôlée soigneusement. Les rendements en produits condensables

Périodes de carbonisation	Départ de l'eau	Dégagement gaz oxygénés	Début du départ des hydrocarbures	Phase à hydrocarbures CmHn	Dissoociation	Phase à hydrogène
Températures en °C	150-200	200-280	280-380	380-500	500-700	700-900
Teneur en carbone : % du charbon	60	68	78	84	89	91
Gaz non condensables						
% { CO ₂	68	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	8,0
Pouvoir calorifique par m ³ de gaz en calories.....	1.100	1.210	3.920	4.780	3.630	3.160
Constituants condensables dans les gaz	vapeur d'eau	vapeur d'eau et acide acétique	acide acétique — alcool méthylique — goudron léger	beaucoup de goudron épais	goudron et paraffine	peu de condensation
Quantités de gaz.....	très faibles	faibles	importantes	importantes	faibles	très faibles

et la qualité du charbon obtenu dépendent en effet de la conduite de la distillation, qui doit être aussi régulière que possible, et de la température finale de recuit.

Différents procédés de fabrication.

Le charbon de bois, obtenu en laboratoire dans des cornues ou des fours électriques de petite capacité, peut être produit en plus grand dans différents types d'appareils :

LES MEULES A CHARBON recouvertes de terre qui sont les ancêtres des appareillages de carbonisation en forêt.

LES FOURS FORESTIERS TRANSPORTABLES qui ont été inaugurés au début du siècle pour réduire,

par rapport aux meules traditionnelles, la durée de l'opération, la pollution du charbon par la terre et le gravier et l'importance de la main-d'œuvre. Ces fours sont des appareils métalliques construits en tôle d'acier. On distingue les fours à tirage inversé, à tirage direct, les fours à charbonnette, les fours cornues.

LES INSTALLATIONS FIXES : ce sont des appareils industriels de grandes dimensions réalisés soit en terre réfractaire (le plus souvent), soit en tôle de fer. Les dimensions peuvent aller jusqu'à 400 m³. L'apport de chaleur est réalisé par les gaz de combustion d'un foyer extérieur. On peut aussi recycler les gaz formés au cours de la distillation. Les produits condensables et les goudrons peuvent être récupérés.

PRODUITS FORMÉS A LA CARBONISATION

On distingue, comme on l'a déjà signalé, le charbon de bois et les produits de distillation constituant le pyrolygneux.

LE CHARBON DE BOIS.

Le mot « charbon de bois » est le terme général représentant le produit solide obtenu en carbonisant la forêt. Mais selon les techniques retenues et l'usage auquel il est destiné, on aboutit à un charbon très différent.

Les différents types de charbons de bois sont les suivants :

Charbon pour usage domestique (cuisson des aliments ; chauffage ménager, etc...). Le charbon ne doit pas être trop dur, il doit être facilement inflammable et ne doit pas dégager de fumées ou « fumerons ». La composition chimique n'a pas d'importance. Ce charbon peut être obtenu à basse température (350°-400° par exemple).

Charbon métallurgique (réduction des minerais dans les hauts fourneaux, fonderie, ferro-alliages, etc...). La préparation de ce charbon demande des techniques plus élaborées. La carbonisation doit être conduite à haute température (650° au moins) avec une durée de recuit assez longue. De plus, on a intérêt à sélectionner, pour cet usage, la matière première ligneuse : rondins de bois denses, écorcés. Les exigences de qualité pour ce type de charbon sont assez sévères. Du point de vue mécanique, il doit être dense, peu friable et avoir une bonne résistance à la compression. Du point de vue composition chimique, les taux de matières volatiles et de cendres doivent être bas, en particulier les taux de phosphore (dont les valeurs limites à ne pas dépasser peuvent varier de 0,001 % à 0,1 % selon le type de fabrication et la nature du minerai traité). Le charbon doit renfermer au moins 80 % de carbone.

Charbon pour gazogène. Force motrice : les critères de caractérisation sont moins sévères que les précédents. Le charbon ne doit pas être trop friable, sa densité apparente doit dépasser 0,3 et son taux de cendres ne doit pas être supérieur à 3 %, il doit avoir une teneur en carbone de 75 %. Actuellement, on utilise peu de charbon pour gazogènes.

Charbon actif (décoloration des produits alimentaires, usages médicaux, désinfection, cartouches de masques à gaz, épuration des solvants, lutte contre la pollution, etc...). Le charbon doit être léger et avoir une grande porosité. On peut utiliser des bois légers ; la noix de coco a aussi donné d'excellents résultats. Pour augmenter le pouvoir absorbant, certains traitements préliminaires du bois peuvent être effectués (par exemple le trempage du bois dans une solution d'acide phosphorique, de chlorure de zinc, etc...). Enfin pour l'industrie alimentaire ou pharmaceutique, le charbon doit évidemment être exempt de composés métalliques toxiques.

Charbon pour l'industrie chimique (cyanure de potassium, carbures, sulfure de carbone, etc...). Les exigences varient selon les buts recherchés, on demande évidemment une bonne pureté liée à une bonne réactivité chimique.

Autres usages : charbon pour la cimenterie (produit pulvérulent à bonne inflammabilité), charbon pour l'horticulture (enrichissement de la terre), etc.

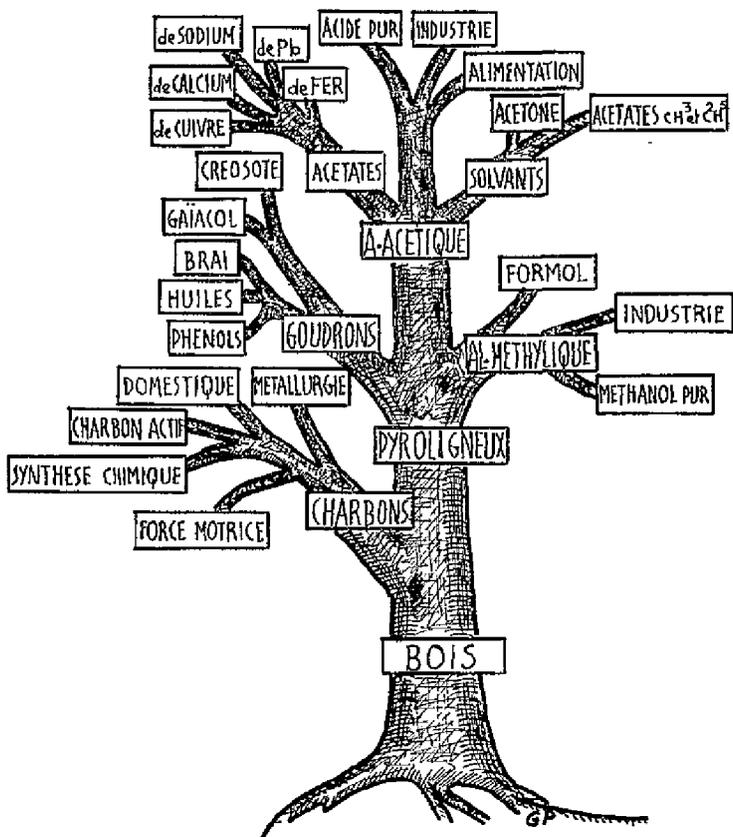


SCHÉMA 1. — Différents composés pouvant être produits à partir du bois.

LES PRODUITS DE DISTILLATION.

Dans le chapitre précédent traitant de l'évolution de la carbonisation, on a déjà cité les différents produits théoriquement obtenus au cours de la pyrolyse du bois et on a noté que, outre le charbon, on recueillait des produits condensables (constituant le pyroligneux) et les gaz.

Produits condensables.

Ces produits sont représentés tout d'abord par de l'eau (les 3/4 au moins de la totalité de liquide pour des bois à 10-15 % d'humidité), puis par de l'acide acétique et ses homologues propioniques et butyriques, de l'alcool méthylique, de l'alcool allylique, de l'acétone, quelques composés basiques (ammoniac, amines) puis des goudrons. Avec les résineux, le liquide recueilli se sépare souvent en deux phases, l'une comprenant le pyroligneux proprement dit de couleur jaune, l'autre les goudrons de couleur plus foncée. Pratiquement, il est parfois difficile, en particulier avec les bois feuillus, d'obtenir une séparation nette de ces deux phases et l'on a souvent affaire à un liquide brun ou jaune foncé dont le poids correspond à 40 à 50 % du

Bois	Acide acétique	Méthanol	Acétone	Goudrons
<i>Résineux</i> (Pin, Sapin, Epicéa)	2 à 3,5	0,4 à 0,9	0,18 à 0,2	10 à 20
<i>Feuillus tempérés</i> (Hêtre, Bouleau, Erable)	5 à 8	1,6 à 2,5	0,2	6 à 8
<i>Feuillus tropicaux</i>	2 à 6	0,7 à 2,5	0,15 à 0,2	4 à 14

pois du bois, sur lequel surnagent quelques huiles légères.

Les quantités des différents composés que l'on peut obtenir par pyrolyse des bois atteignent les valeurs précédentes : (exprimées en % des bois absolument secs).

Les goudrons de feuillus ont une teinte foncée, allant du brun au noir. Ils sont principalement constitués par de la créosote avec de petites quantités de benzène, xylène, etc... Ces goudrons à l'état brut sont assez peu appréciés. Par contre, les goudrons de résineux, plus légers et de couleur plus claire, allant du jaune à l'orange, sont plus intéressants d'un point de vue chimique car ils contiennent des terpènes.

Produits gazeux.

Le volume et la composition des gaz non condensables dépendent, comme les autres produits de distillation, de la technique de fabrication. La distillation sèche d'un bois fournit en moyenne 15 à 20 % de son poids en gaz. La composition de ces

gaz est environ 60 % de gaz carbonique, 30 % d'oxyde de carbone, quelques % de méthane, quelques dixièmes de % d'éthane, le reste correspondant à de l'hydrogène, de l'éthylène et autres carbures non saturés, du propane, du butane, du pentane, etc...

Le bois peut donc être considéré comme une matière première riche qui peut fournir, par pyrolyse, une gamme de produits intéressants pour la synthèse chimique, pour l'industrie métallurgique, pour la production d'énergie, etc... Le schéma n° 1 illustre ces différentes possibilités théoriques. D'un point de vue pratique, chacune de ces possibilités ne présente pas toutefois un intérêt de même importance. Dans le cas de la pyrolyse des bois tropicaux, deux orientations préférentielles sembleraient se dessiner dans le sens :

- de la fabrication de charbon de bois pour la métallurgie.
- de la production d'énergie.

Ces deux points particuliers seront traités plus en détail dans la suite de cet article.

ESSAIS DE CARBONISATION EFFECTUÉS AU C. T. F. T.

Au cours des 15 dernières années, la Division Cellulose et Chimie du C. T. F. T. a procédé à des tests de carbonisation sur de nombreux bois tropicaux (plus d'une centaine). Ces essences provenaient :

- du Gabon,
- du Niger,
- de Madagascar,
- du Venezuela
- du Surinam.
- du Brésil,

Selon le but recherché, les carbonisations ont été conduites à des températures diverses mais la technique suivie était la même.

MODE OPÉRATOIRE ET APPAREILLAGE UTILISÉ.

Les carbonisations ont été effectuées dans des fours électriques de laboratoire : les essais les plus anciens avec un appareil de petites dimensions, pouvant contenir trois kilos de bois environ, et les pyrolyses plus récentes dans un four de plus grande capacité (40 l) dans lequel 9 à 13 kg de bois peuvent être introduits. Les fours sont munis d'un couvercle fixé par des vis à oreilles et comportant un passage central destiné à recevoir une canne pyrométrique et un tube d'évacuation des gaz avec vanne de fermeture. La température à l'intérieur est contrôlée à l'aide d'un pyromètre enregistreur, le réglage de l'intensité électrique répartie sur les parois

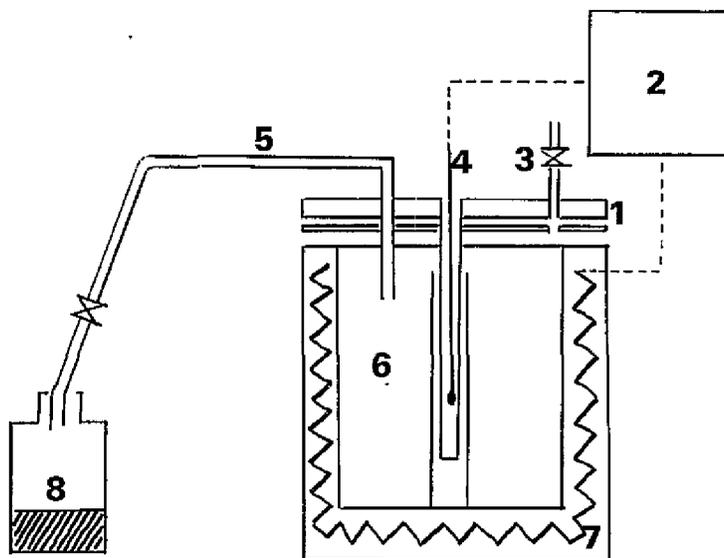
et à la base du four étant réalisé à l'aide de rhéostats. Un croquis de l'appareillage est donné au schéma n° 2. Le chargement est effectué avec des rondins écorcés, des rondins refendus ou des baguettes en fonction de la nature de l'échantillonnage de bois en essayant de réaliser un remplissage maximum pour éliminer dans la mesure du possible une trop grande présence d'air. Tout d'abord, la température du four est élevée jusqu'à 110-130 °C et cette température est maintenue pendant une nuit pour assurer le séchage complet du bois. La montée en palier a lieu ensuite le plus régulièrement possible en évitant les phénomènes de surchauffe dus à la réaction exothermique. Quand le palier est atteint, un réglage final permet de maintenir la température pendant plusieurs heures. A la fin de la pyrolyse, la vanne d'évacuation est fermée pour éviter toute rentrée d'air. On laisse alors refroidir le four jusqu'à température ambiante avant de procéder à l'ouverture du couvercle pour la récupération du charbon. Le charbon est alors pesé et l'on détermine le rendement en % du bois initial absolument sec. Ce rendement varie de 25 à 35 % selon les bois et les conditions de carbonisation retenues.

TESTS DE QUALITÉ DU CHARBON DE BOIS.

Caractéristiques physiques. On détermine la densité, la friabilité et la résistance à la compression de flanc. Les modes opératoires suivis sont les suivants :

DENSITÉ. — D'une part, la densité réelle des charbons est déterminée suivant les prescriptions de la norme française d'essai des Bois n° B 51.005 sur des éprouvettes de charbon de 2 à 6 cm³. Le volume est mesuré à l'aide d'un volumètre à mercure donnant une précision de 2 mm³, et le poids sur une balance donnant une précision d'un centigramme. D'autre part, le poids du sac de charbon de 100 l (ou poids spécifique du charbon en vrac) est estimé, pour des morceaux de grosseur moyenne (10 à 30 cm), en admettant un coefficient de remplissage de 0,45.

FRIABILITÉ. — Les mesures de friabilité sont faites avec un appareillage composé d'un cylindre



SCHEMA 2. — Four de laboratoire pour carbonisation :

1. Couvercle et joint ; 2. Régulation du chauffage ; 3. Soupape de sûreté ;
4. Canne pyrométrique ; 5. Evacuation gaz et pyrolyseuse ; 6. Cuve de carbonisation ; 7. Résistances chauffantes ; 8 Récupération des produits condensables.

en tôle à axe horizontal (Ø 30 cm, longueur 25 cm), comportant suivant un plan radial une plaque de tôle soudée allant de la périphérie au centre, fermé par un couvercle et tournant à 30 tours/mn environ. Les quantités de charbon testées sont pour chaque essai de 500 g, les morceaux de charbon étant calibrés pour passer au travers d'un tamis à mailles de 60 mm et être retenus par un tamis à mailles de 20 mm. Après 500 tours, on détermine le pourcentage de poussières et le pourcentage de charbons retenus par le tamis de 20 mm.

RÉSISTANCE A LA COMPRESSION DE FLANC. — Ce test est réalisé sur des parallélépipèdes de charbon ayant les dimensions suivantes : longueur 40 mm, section 20 × 20 mm, avec une machine statique comprenant deux plateaux parallèles. Le charbon est comprimé entre les plateaux dont l'un est monté sur rotule pour appliquer uniformément les forces sur les surfaces en contact. On exprime le résultat en charge de rupture par cm².

Caractéristiques chimiques. Les analyses chimiques suivantes sont effectuées sur chaque charbon :

MATIÈRES VOLATILES. — Les matières volatiles sont déterminées par la perte de poids subie par le charbon maintenu pendant 10 mn à 900° en creuset fermé par un couvercle.

CENDRES. — Les cendres totales correspondent au poids du résidu après incinération à 425° jus-

qu'à disparition des points noirs et jusqu'à poids constant.

SILICE. — Le dosage de la silice est effectué par attaque des cendres au mélange nitroperchlorique à l'ébullition, reprise à l'eau et filtration de l'insoluble. Le précipité restant correspond à la silice contenue dans le charbon et aux impuretés. Ces impuretés sont isolées par attaque à l'acide fluorhydrique bouillant et calcination. On pèse les résidus avec une balance sensible au 1/100 de mg. On calcule $SiO_2 =$ précipité après traitement nitroperchlorique — résidu après traitement FH.

PHOSPHORE. — Le dosage est fait sur les cendres de charbon en deux stades : minéralisation à ClH et FH puis dosage spectrophotométrique en présence de réactif nitrovanadomolybdique. En solution acide, en présence d'ions V^{5+} et Mo^{6+} , l'acide phosphorique donne un complexe phosphovanadomolybdique jaune, dont la densité optique est mesurée à 430 mu. Le résultat est repéré à l'aide d'une courbe étalon obtenue avec du phosphate monopotassique rigoureusement pur.

SOUFRE. — Le dosage du soufre total comprend aussi deux étapes : attaque des cendres de charbon par un mélange de 2 parties d'oxyde de magnésium et d'une partie de carbonate de sodium anhydre à 800° pour transformer le soufre en sulfate, précipitation du sulfate de baryum par addition de Cl_2Ba , isolation du précipité et pesée sur une balance au 1/100 de mg.

On a $S = SO_4Ba \times 0,1373$.

REPRISE D'HUMIDITÉ. — La reprise d'humidité est faite sur des charbons secs sortant du four que l'on maintient pendant 3 jours en salle conditionnée à 20 °C et 65 % d'humidité relative. Les pesées sont faites au mg près avant et après conditionnement.

RÉSULTATS OBTENUS AU POINT DE VUE CHARBON.

Il serait fastidieux d'énumérer ici la totalité des résultats enregistrés pour chaque essence. Des rapports et des tableaux de chiffres ont été rédigés en leur temps à la Division de Cellulose et Chimie où ils peuvent éventuellement être consultés. Il a paru plus intéressant de signaler les bois ayant donné des résultats remarquables, bons ou mauvais.

Il est toutefois difficile d'effectuer un classement très strict des charbons. On a vu en effet précédemment que les exigences de caractéristiques pour un « bon » charbon variaient selon l'usage auquel il était destiné. De plus les qualités d'un charbon sont aussi fonction de la technique de préparation. Enfin une conclusion définitive sur l'aptitude d'une essence pour la carbonisation ne peut être tirée que si l'on dispose d'un échantillonnage varié et suffisamment représentatif. Avec ces réserves, les tableaux suivants ont été constitués.

Essences ayant donné des charbons très résistants.

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Provenance	Densité		Friabilité du charbon	Compression de flanc du charbon
			du bois	du charbon		
Palétuvier rouge	<i>Rhizophora mangle</i> L.	Venezuela		0,8 à 0,9	peu friable	bonne à très bonne
Eucalyptus	<i>Eucalyptus robusta</i>	Madagascar		0,5 à 0,6	très peu friable	très bonne
Ewomeu	<i>Coula edulis</i>	Gabon	1,07	0,76	peu friable	très bonne
Ebam	<i>Pteraltia nitida</i>	Gabon	0,97	0,87	très peu friable	très bonne
NGom	<i>Heisteria</i> sp. (H. Zim- merel)	Gabon	0,88	0,84	peu friable	très bonne
Otuang	<i>Xylopia</i> sp. (type <i>X. hypolampe</i>)	Gabon	0,72	0,56	très peu friable	très bonne
Goupi	<i>Goupia glabra</i>	Surinam	0,86	0,71	peu friable	bonne
	<i>Prosopis africana</i>	Niger		0,72	très peu friable	très bonne
Acacia	<i>Acacia macrostachya</i>	Niger		0,66	très peu friable	bonne
Pau d'Arco	<i>Tabebuia serratifolia</i> (<i>T. ipe</i>)	Brésil	1,0	0,78	assez peu friable	bonne

Essences ayant donné des charbons peu résistants.

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Provenance	Densité		Friabilité du charbon	Compression de flanc
			du bois	du charbon		
Okoumé	<i>Aucoumea klaineana</i>	Gabon	0,46	0,26	peu friable	très faible
	<i>Diptotropis</i> sp.	Surinam	0,6 à 0,8	0,57	assez friable	très faible
	<i>Macoubea guianenum</i>	Surinam	0,4 à 0,35	0,35	peu friable	très faible
Aroeira	<i>Astronium fraxinifolium</i>	Brésil	1,1	0,73	assez friable	très faible
Gonçalo Alves	<i>Astronium</i>	Brésil	0,75	0,45	moyennement friable	faible

Essences ayant donné des charbons contenant des taux de phosphore élevés.

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Provenance	Taux de phosphore	
			des bois	des charbons
Caïcedrat	<i>Khaya senegalensis</i>	Niger	—	0,08 %
Marupa	<i>Simarouba amara</i> <i>Agonandra sylvatica</i> <i>Miconia</i> sp.	Surinam	—	0,08 %
			—	0,13 %
			—	0,07 %
Eucalyptus	E. « 12 ABL »	Congo	0,04 à 0,11	0,11 à 0,30 %

Parmi les essences recensées, quelques-unes d'entre elles accusaient des taux de phosphore assez élevés. Comme la quasi-totalité des cendres de bois se retrouvent dans les charbons, ces derniers pouvaient devenir impropres pour certains emplois métallurgiques. Ces bois sont indiqués ci-dessus :

On a remarqué de plus que les quantités de phosphore dépendaient de plusieurs facteurs à savoir de la nature de l'essence mais aussi du lieu de récolte, de la nature du sol, de la présence ou de l'absence d'engrais. Ainsi un échantillon d'Eucalyptus PF1 ayant poussé à Loudima avait quatre fois moins de phosphore qu'un autre échantillon planté à Pointe-Noire. Il en était de même pour les Eucalyptus « 12 ABL » de Pointe-Noire qui accusaient deux fois plus de phosphore que ceux de Loudima. Enfin, l'addition d'engrais complets au cours de la plantation se traduisait aussi par une augmentation des pourcentages de phosphore de 10 à 35 % selon l'essence.

RÉSULTATS OBTENUS DU POINT DE VUE PRODUITS DE DISTILLATION.

Les produits de distillation des bois n'ont pas été, jusqu'à présent, étudiés de façon systématique. Toutefois, on peut citer à titre d'exemple les résultats obtenus sur un mélange hétérogène de bois d'Amérique Latine.

Gaz totaux.

Les quantités totales de gaz recueillies, au cours de la combustion, étaient de l'ordre de 125 l par kg de bois sec, soit un rendement de 17 % en poids par rapport au bois. Ces gaz étaient principalement constitués par :

- du gaz carbonique (CO₂) = 30 % en volume ou 10,5 % en poids par rapport au bois ;
- de l'oxyde de carbone (CO) = 22 % en volume ou 5 % en poids par rapport au bois ;

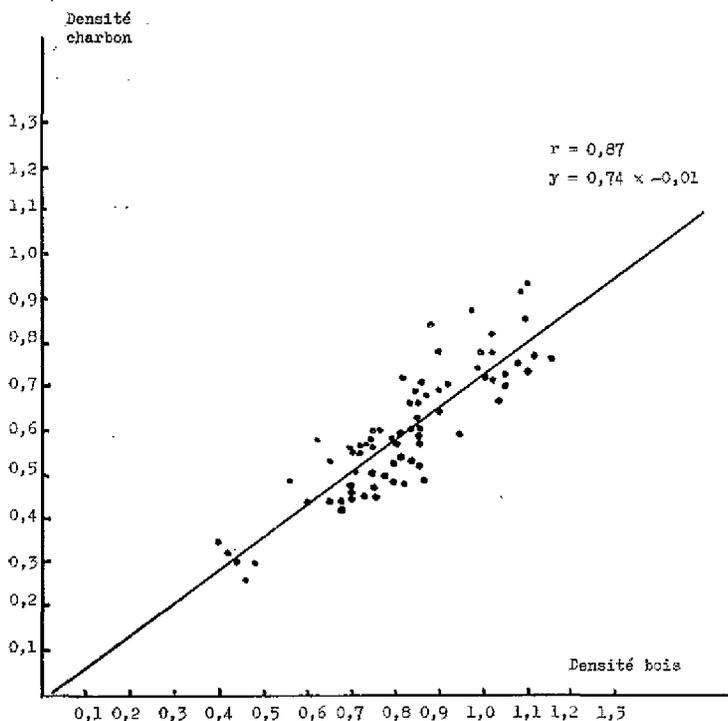


SCHÉMA 3. — Corrélation entre la densité des bois et la densité des charbons.

— du méthane (CH_4) = 8 % en volume ou 1 % en poids par rapport au bois ;

— de l'éthane (C_2H_6) = 0,9 % en volume ou 0,2 % en poids par rapport au bois.

La présence d'autres produits tels qu'hydrogène, propane, butane, pentane, éthylène, propylène, butène et pentène a été aussi remarquée. Mais les quantités formées étaient très faibles (de 0,07 % à moins de 0,01 % du poids du bois sec).

Produits condensables.

Le pyroligneux contenait en plus de l'eau du bois et de l'eau formée à la pyrolyse, les produits suivants :

— Acétone ($\text{CH}_3\text{—CO—CH}_3$) + acide formique (H—COOH) = 1,4 % en poids par rapport au bois.

— Méthanol ($\text{H—CH}_2\text{OH}$) = 2,5 % en poids par rapport au bois.

— Acide acétique ($\text{CH}_3\text{—COOH}$) = 5,8 % en poids par rapport au bois.

— Acétate de méthyle ($\text{CH}_3\text{—COOCH}_3$) = 0,6 % en poids par rapport au bois.

— Gaiacol ($\text{CH}_3\text{O—C}_6\text{H}_4\text{—OH}$) = 0,45 % en poids par rapport au bois.

— Phénol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) + o-crésol ($\text{CH}_3\text{—C}_6\text{H}_4\text{OH}$) = 0,5 % en poids par rapport au bois.

— m + p crésol ($\text{CH}_3\text{—C}_6\text{H}_4\text{OH}$) = 0,3 % en poids par rapport au bois.

— Méthyléthylcétone ($\text{CH}_3\text{—CO—C}_2\text{H}_5$) = 0,05 % en poids par rapport au bois.

RECHERCHES DE LOIS GÉNÉRALES. ÉTABLISSEMENT DE CORRÉLATIONS.

Enfin, on a essayé de déterminer si l'on pouvait tirer des résultats obtenus quelques lois générales et on a recherché en particulier la présence ou l'absence de corrélations entre la densité des bois et différentes caractéristiques des charbons.

Densité des bois et densité des charbons.

Sur 79 couples de valeurs, le coefficient de corrélation r est de 0,87. Cette valeur est forte, elle est très significative au niveau de confiance de 0,95. Notons d'ailleurs qu'un chiffre de 0,23 serait déjà significatif pour le nombre d'échantillons considérés. On se reportera au schéma n° 3 où est tracée la droite de régression. Une bonne corrélation existe donc entre la densité des bois et celle des charbons résultants. Pour la fabrication de charbon métallurgique, on aura donc intérêt à choisir de préférence des bois denses et compacts.

Densité des bois et friabilité des charbons.

Les calculs ont été faits pour 79 couples de valeurs. Le coefficient r est de 0,46 ce qui traduit une liaison d'intensité moyenne entre ces deux variables.

Densité des bois et résistance à la compression de flanc des charbons.

Pour le même nombre de couples que précédemment, le coefficient r n'est que de 0,22. Sur les données en présence, l'existence d'une liaison entre ces deux caractéristiques semble douteuse.

Densité des charbons et friabilité.

On dispose dans ce cas d'un nombre plus élevé de résultats (111 couples). Malgré cela, le coefficient r est assez bas : 0,23 ; la corrélation entre les caractéristiques considérées semble donc très lâche.

Densité des charbons et résistance à la compression de flanc.

Sur 111 couples, on a trouvé un coefficient de corrélation de 0,44. Une corrélation d'intensité moyenne semblerait donc exister entre ces valeurs.

Malgré le nombre assez élevé de tests effectués, la seule corrélation de haut niveau a trait aux densités des bois et des charbons résultants. Les liaisons entre la densité et les autres caractéris-

tiques, bien que non nulles, restent d'une intensité assez faible. De meilleures corrélations auraient peut-être pu être obtenues en faisant intervenir d'autres données, en particulier d'autres caractéristiques de résistance des bois, en considérant

uniquement les carbonisations effectuées à une température identique ou encore en modifiant les conditions des essais mécaniques des charbons de façon à obtenir des résultats plus reproductibles et plus significatifs.

UTILISATION DU BOIS COMME SOURCE D'ÉNERGIE

COMPARAISON DES POUVOIRS CALORIQUES DE QUELQUES MATIÈRES PREMIÈRES SUSCEPTIBLES DE FOURNIR DE L'ÉNERGIE.

Depuis toujours, on a utilisé le bois comme source d'énergie par simple combustion du matériau ligneux. Une amélioration intervint ensuite avec la fabrication de charbon de bois qui possède, d'une part, un pouvoir calorifique plus élevé que le bois et permet, d'autre part, de disposer de gaz susceptibles d'être brûlés à leur tour. On trouvera dans le tableau suivant les pouvoirs des divers combustibles usuels exprimés en Calories par kg pour les produits solides ou liquides et en Calories par m³ aux conditions normales pour les composés gazeux en comparaison de ceux du bois et du charbon de bois.

ESSAIS EFFECTUÉS EN FRANCE SUR DES BOIS MÉTROPOLITAINS.

Avant la dernière guerre mondiale, le charbon de bois provenait des meules ou était fabriqué

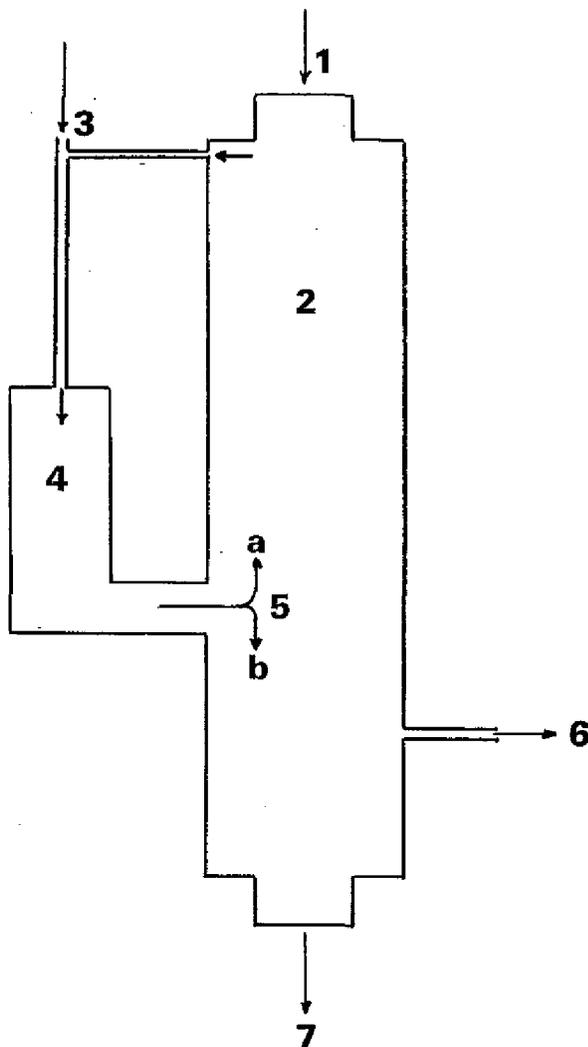
dans des cornues chauffées au charbon de houille. Il fallait dans ce cas brûler 500 kg de houille pour obtenir une tonne de charbon de bois ce qui représentait un rendement énergétique vraiment peu intéressant.

L'idée d'utiliser le bois pour la production d'un fluide énergétique est plus récente. Dès 1938, la Direction des Poudres s'était inquiétée de pallier une éventuelle pénurie d'essence due à un blocus et à ce titre s'était intéressée à la synthèse de carburant à partir du bois. Des contacts avaient été pris avec un spécialiste de la gazéification, M. de LACOTTE, qui avait obtenu un gaz de synthèse, c'est-à-dire un mélange d'oxyde de carbone et d'hydrogène dans la proportion : $CO + 2 H_2$. Ce mélange était particulièrement intéressant car il permettait d'obtenir de l'essence par le procédé FISCHER et TROPSCH.

En fait il n'y eut qu'une très petite production expérimentale de carburant à partir du bois, à Bergerac et à Angoulême, pendant la guerre. Toutefois l'on procéda à une fabrication plus importante d'alcool méthylique, de meilleure qualité que le méthanol de synthèse, qui fut utilisé par l'industrie des poudres.

Type de combustible	Matière première	Pouvoir calorifique
Combustibles pétroliers	Essence	10.500 (en Cal/kg)
	Pétrole	10.400
	Gasoil	10.300
	Fuel-oil léger	10.400
	Fuel-oil lourd	9.900
Autres combustibles	Méthanol	4.700 (en Cal/kg)
	Ethanol	6.400
	Benzol	9.650
	Charbon ordinaire	5.800 à 7.500
	Anthracite	8.000
	Coke	7.200
Combustibles à base de bois	Bois sec	4.200 à 4.800 (en Cal/kg)
	Charbon de bois sec *	7.800 à 8.000
Combustibles gazeux	Gaz naturel (méthane)	8.200 (en Cal/m ³)
	Propane	21.000
	Butane	28.000
	Gaz d'éclairage (gaz de cokerie)	4.000 à 5.000

(*) Pour un charbon de bois ayant repris à l'air 7 % d'humidité, le pouvoir calorifique se situe entre 7.000 et 7.500 calories.



SCHEMA 4. — Schéma du four Lacotte :

1. Arrivée du bois ; 2. Chambre de carbonisation ; 3. Injection d'air et mélange avec les gaz de carbonisation ; 4. Chambre de combustion (900 à 1.000°) ; 5. Répartition des gaz ; a) Recyclage sur charbon de bois b) Evacuation par 6 ; 6. Départ des gaz vers moteur ; 7. Evacuation charbon de bois.

De plus, on sait que le méthanol (dont l'indice d'octane est de 136) est un bon carburant qui peut être incorporé à de la vapeur d'eau et de l'essence en donnant un produit combustible dans les moteurs.

Malgré ces perspectives intéressantes, les recherches furent pratiquement stoppées à la fin de la guerre en raison des facilités d'approvisionnement en carburant pétrolier sur le marché international.

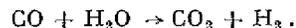
Actuellement, compte tenu de la crise de l'énergie, ces problèmes sont de nouveau d'actualité, et d'un point de vue théorique, on peut schématiser comme suit les possibilités d'emploi du bois :

Les réactions exothermiques qui interviennent

vers 325° lors de la carbonisation du bois permettent d'obtenir des gaz volatils condensables et incondensables et des goudrons qui peuvent être brûlés vers 800-1.000° pour donner un mélange d'oxyde de carbone, de gaz carbonique, d'hydrogène et de vapeur d'eau ainsi que de l'azote, gaz inerte, si la combustion a été réalisée avec adjonction d'air. Le recyclage de ces gaz à température élevée sur le charbon de bois qui sert de catalyseur, permet d'augmenter dans le mélange les quantités de gaz intéressants.

Si la combustion du gaz primaire s'effectue avec de l'oxygène pur, c'est-à-dire en l'absence d'azote, on peut régler les conditions de marche et obtenir, avec un appoint de vapeur d'eau, un mélange intéressant constitué de 33 % de CO₂ (éliminable à l'eau) et 66 % d'un gaz riche en hydrogène appelé « gaz de synthèse » dont la composition est CO + 2 H₂.

L'enrichissement en hydrogène est fourni par la réaction suivante :



Le passage des gaz sur le charbon de bois permet aussi de décomposer une nouvelle quantité de matière première et de produire une quantité supplémentaire de gaz. Le rendement en charbon de bois peut donc être réduit autant que l'on veut au profit d'une augmentation du rendement en gaz. A la limite, le rendement en charbon de bois peut être nul.

L'utilisation des gaz, et en particulier de l'hydrogène, peut se combiner avec celle de l'azote résiduel résultant de la préparation de l'oxygène. On a alors tous les éléments nécessaires pour la préparation de produits azotés selon le processus suivant :

Azote + Hydrogène → Ammoniac → Urée → engrais azotés et autres dérivés organiques.

Si, à la place de l'oxygène, on utilise de l'air pour brûler les gaz primaires de carbonisation, on obtient un gaz différent du gaz de synthèse mais capable cependant de brûler dans un moteur à explosion et même dans un moteur diesel si on ajoute 5 à 7 % de fuel.

Actuellement une unité expérimentale de ce type fonctionne depuis mai 1974 à la Sté DISTI-BOIS à Rans dans le Jura. La station comporte un système de carbonisation alimentant un moteur diesel de 600 CV. L'installation d'un deuxième diesel de même puissance est imminente, ce qui portera la capacité totale à 1.200 CV. Auparavant des essais préliminaires réalisés dans une petite unité de 90 CV avaient donné satisfaction.

La carbonisation, conforme au schéma n° 4, s'effectue à partir de déchets de bois de la forêt de Chaux (houppiers, souches, etc...). Le prix de revient du bois correspond pratiquement aux coûts du tronçonnage et du transport entre la forêt et l'usine. Il faut compter environ 1 kg de bois sec

pour 1 kwh. Cette unité doit servir de modèle pour une future usine de 8.000 kw, seuil à partir duquel la rentabilité pourrait être atteinte avec un prix de revient du kwh estimé à 6 centimes par le promoteur du procédé.

Il faut aussi noter que la société commercialise du charbon de bois (métallurgie, synthèse chimique, barbecues, etc...). Elle pourrait commercialiser également un constituant des goudrons appelé « huile de fumée ». Cette huile, exempte de produits cancérigènes tels que le benzopyrène, constitue un arôme alimentaire convenant pour la « fumersion » des viandes, poissons, etc... Les huiles de fumée sont douées également d'un pouvoir thérapeutique, en particulier pour le traitement des maladies de la peau (eczéma).

APPLICATION POSSIBLE AUX PAYS TROPICAUX.

Certains pays tropicaux, pauvres en ressources énergétiques d'origine locale, produisent actuellement leur énergie à des prix de revient très élevés. C'est pour ces régions que la création d'unités de ce type pourrait être envisagée si les conditions

de marche d'une exploitation du type décrit ci-dessus se révélaient positives. Les centrales pourraient être alimentées soit par des bois provenant de la forêt naturelle hétérogène, soit par des essences provenant de plantations. Si l'on reprend les chiffres indiqués par l'inventeur du procédé (1 kwh peut être produit par 1 kg de bois sec), on peut calculer la quantité d'énergie qui pourrait théoriquement être produite par un hectare de forêt.

— Cas de la forêt naturelle : si l'on estime qu'un hectare de forêt dense contient 200 à 250 t à l'ha de bois vert soit 140 à 180 t de bois sec, un hectare de cette forêt utilisé en totalité pour la production d'énergie serait susceptible de fournir 140.000 à 180.000 kwh soit très approximativement 20 kw de puissance moyenne pendant 1 an. En tenant compte de la valeur des différents pouvoirs calorifiques du bois, du fuel et de l'alcool (respectivement 4.500, 10.000 et 6.500 cal/kg), on peut aussi en déduire, d'un point de vue théorique, qu'un hectare de forêt est équivalent à 60 à 80 t de fuel ou à 95 à 125 t d'alcool éthylique (qui peut être produit à partir de betteraves).

— Cas des bois de plantation : de même si

*Fabrication de charbon de bois à Niamey (Niger).
Charbon de bois après carbonisation.*

Photo Delwaulle.



l'on admet qu'une plantation d'*E. platyphylla* (PF1) peut fournir (au Congo) 20 t de bois vert par ha et par an soit 14 t de bois sec/ha/an, on pourrait théoriquement produire 14.000 kwh par ha et par an soit environ 2 kw de puissance moyenne pendant un an. Enfin le potentiel énergétique de plantations de ce type peut être traduit comme précédemment en équivalent fuel ou éthanol, ce potentiel serait de 5,5 t de fuel/ha/an ou de 9 t d'alcool/ha/an.

A titre comparatif, on peut signaler qu'en France, un hectare de betteraves donne 40 à 42 t de produit brut à partir duquel il est possible de fabriquer environ 4 t d'éthanol, soit un rendement énergétique/ha/an beaucoup moins avantageux que celui des reboisements tropicaux.

Les forêts tropicales constituent donc un matériau intéressant pour pallier le manque d'énergie de certains pays en voie de développement.

PRODUCTION DE CHARBON POUR LA MÉTALLURGIE

POSSIBILITÉS D'EMPLOI DU CHARBON DE BOIS.

Le plus souvent, l'industrie métallurgique comporte le traitement d'oxydes métalliques par des agents réducteurs. En sidérurgie, on a pendant longtemps réduit l'oxyde de fer à l'aide de charbon de bois. Plus récemment l'usage du coke s'est imposé mais on peut prévoir dans un proche avenir l'emploi de produits pétroliers.

Toutefois, l'usage du charbon de bois n'est pas complètement abandonné et il est encore utilisé dans l'industrie des ferro-alliages. Même en sidérurgie, quelques sociétés ont jugé préférable de retenir un charbon de bois produit localement à la place d'un coke d'importation sensiblement plus coûteux. On peut citer à titre d'exemple La Charcoal Iron Industry à Wundowie en Australie, et La Belgo Mineira Steel Co à Monlevado au Brésil.

La Société australienne produit près de 200.000 t de fonte par an avec du charbon d'*Eucalyptus* récolté à moins de 40 km de l'usine. La carbonisation s'effectue dans des fours continus, à l'aide d'un matériel automatisé qui permettait d'obtenir, il y a quelques années, un coût approximatif de 20 US \$ par t de charbon de bois.

La Société brésilienne, pour une production de fonte du même ordre, utilise du charbon de bois fabriqué essentiellement à partir de la forêt naturelle hétérogène et, dans une moindre mesure, à partir de plantations d'*Eucalyptus*. Les opérations forestières sont moins mécanisées qu'en Australie et la carbonisation s'effectue dans des fours discontinus en brique. Toutefois, grâce à une main-d'œuvre bon marché, le coût du charbon de bois serait inférieur aux coûts australiens.

On peut également signaler l'emploi de charbon de bois sidérurgique en Malaisie (où 64.000 t de charbon métallurgique préparé à partir d'hévéa ont été utilisées en 1968), en Argentine et en Inde (où le charbon est fabriqué à partir de mélanges de feuillus) ainsi qu'en U. R. S. S. et au Japon mais nous manquons d'informations sur les caracté-

ristiques exactes de ces Sociétés. Notons qu'il faut environ 0,7 t de charbon de bois par t de fonte brute.

ASPECT TECHNIQUE.

Au point de vue technique, les caractéristiques les plus importantes du charbon de bois sidérurgique sont la résistance à la compression, la friabilité, et la composition chimique.

Une bonne résistance à la compression est nécessaire pour supporter les poids considérables qui interviennent dans les hauts fourneaux, sinon un écrasement des charbons pourrait gêner le passage des gaz de réaction. D'après certaines estimations brésiliennes, il serait difficile d'utiliser le charbon de bois dans des fourneaux de plus de 600 t/jour et de plus de 19 m de hauteur, ce qui excluerait les très grandes installations de plus de 1.000 t/jour.

On peut toutefois rappeler que l'on a observé une certaine corrélation entre la densité des bois et la résistance des charbons. Il n'est donc pas impossible que quelques essences forestières denses sélectionnées permettent de repousser les limites d'utilisation. Ce serait semble-t-il le cas de l'usine australienne de Wundowie où l'on signale que c'est le ramollissement du minerai de fer et non la résistance du charbon d'*Eucalyptus marginata* qui limite la hauteur et la capacité du haut fourneau.

En ce qui concerne la composition chimique, il est souhaitable de disposer d'un charbon contenant peu de produits volatils et peu de cendres. La teneur en produits volatils peut être réduite en augmentant la température de carbonisation et ce point de vue n'offre pas de très grande difficulté. Le problème des cendres est plus délicat. Il faut en principe éviter la présence de soufre, de phosphore, de silice dont les proportions dans les bois et charbons de bois dépendent de la nature de l'essence et de la nature des terrains. Les teneurs limites sont imprécises et varient selon les origines de 0,01 à 0,1 % et parfois même au-delà. Il est donc difficile



Photo J. Doat.

Chantier de carbonisation dans les Landes. Fours métalliques en état de marche.

de prévoir à l'avance l'aptitude d'un type de bois ou de forêt pour la fourniture du charbon sidérurgique et des essais probatoires seront chaque fois nécessaires. On peut toutefois signaler que l'Eucalyptus australien ne présente à ce point de vue aucune difficulté. Avec 0,25 % de cendres, 0,03 % de phosphore et 0,015 % de soufre, ce bois s'est révélé être une bonne matière première. La forêt brésilienne se situe moins favorablement mais peut quand même être utilisée.

Notons que l'option prise par une unité sidérurgique pour l'emploi du coke ou du charbon de bois n'est pas obligatoirement définitive. Des conversions sont possibles en modifiant certaines données opératoires (quantités de fondants par exemple) ainsi que le type de revêtement des fours. La conversion de hauts fourneaux du type « coke » de très grande capacité en hauts fourneaux de type « charbon de bois » pourrait cependant poser des problèmes difficiles à résoudre si l'on dispose de charbon trop friable. Il faudrait alors en limiter la capacité. La conversion inverse de fourneaux de type « charbon de bois » en type « coke » serait plus facile.

En ce qui concerne les alliages métalliques tels que les ferro-manganèse, ferro-silicium, silico-manganèse, etc... les exigences de résistance à la compression

sont moindres car les fours sont de plus petite capacité, mais les teneurs en cendres doivent être contrôlées avec la même sévérité en particulier les teneurs en phosphore. Il est toutefois bien difficile de définir les seuils au-delà desquels les charbons de bois sont impropres à une utilisation industrielle. Certaines sociétés électro-métallurgiques semblent exiger des charbons très purs avec moins de 0,01 % de phosphore. D'autres sont plus tolérantes et accepteraient 0,1 à 0,2 %. En fait ces problèmes sont liés à la nature et à la qualité du minéral à traiter. Par exemple le phosphore est peu gênant pour le carbure de calcium mais il n'en est pas de même pour des ferro-alliages peu silicés qui captent avec un rendement élevé le phosphore des réducteurs. Chaque cas est donc spécifique et il importe d'étudier le problème dans son ensemble, c'est-à-dire en tenant compte de la composition des minerais utilisés, de la composition des réducteurs et de la spécification des ferro-alliages à produire.

ASPECT ÉCONOMIQUE.

Les problèmes économiques sont essentiellement liés au prix de revient du coke et du charbon de bois

livrés à l'usine qui représentent une part très importante du prix de revient.

Il y a quelques années, le prix du coke dans les régions industrialisées était de 20 US \$ la tonne. Il était passé à 30 US \$ la tonne avant la crise de l'énergie et bien que nous manquions d'informations sur les cours les plus récents, on peut avancer que la tendance actuelle est très probablement à la hausse.

Pour de nombreux pays tropicaux ne disposant pas de mines de houille, le coût du coke importé est beaucoup plus élevé. Des renseignements brésiliens datant de 1972 donnaient un prix de 52 US \$ la tonne de coke rendu usine.

Le prix du charbon de bois est très variable d'une région à l'autre. Dans les pays industrialisés, il est devenu difficilement compétitif.

Dans les régions tropicales, le coût du charbon de bois est plus avantageux. Il était estimé à 23 US \$ la tonne en 1972 au Brésil.

En Afrique de l'Ouest, des estimations faites par le Centre Technique Forestier Tropical ont montré que du charbon de bois d'Eucalyptus de plantation, produit de façon artisanale en très petites quantités dans des fours discontinus reviendrait à environ 40 US \$ la tonne (estimation 1974). Une fabrication en grande quantité dans des fours continus serait bien entendu plus avantageuse et permettrait probablement de descendre au-dessous de 30 \$. Ces chiffres paraissent très compétitifs par rapport à ceux du coke qui serait importé dans ces mêmes régions.

La comparaison du prix de revient d'une tonne de fonte au charbon de bois ou au coke ne doit pas se limiter à une simple estimation du coût des matières premières réductrices. D'autres éléments interviennent, tels que les modifications opératoires pouvant entraîner des accroissements ou des réductions dans l'emploi de certains produits d'adjonction comme les fondants, l'augmentation de l'investissement due à la construction des fours à charbon, les différences éventuelles de qualité du produit final. Ces éléments ont toutefois une incidence moins marquée que celle du coût du charbon de bois ou du coke.

A titre d'exemple, une estimation brésilienne relative au prix de revient de la fonte avec une

production théorique de 1.000 t/jour donnait pour 1972 les valeurs suivantes :

Tonne de fonte au charbon de bois....	US \$ 38
Tonne de fonte au coke	46

Le bas coût du charbon de bois brésilien représente dans ce cas particulier un élément très avantageux mais il est probable que la solution au charbon de bois resterait économiquement valable dans beaucoup d'autres régions, même avec un prix plus élevé.

PERSPECTIVES AFRICAINES.

Une production sidérurgique ne peut se concevoir qu'à long terme dans le cas des pays d'Afrique Noire, car les difficultés à surmonter sont importantes. Les pays comme le Gabon qui possèdent d'importants gisements de minerai de fer auront toutefois la possibilité, dans un premier temps, d'exporter leurs matières premières ; il est cependant peu probable que l'on puisse les traiter sur place avant quinze ou vingt ans.

Les perspectives sont plus encourageantes en ce qui concerne les allages métalliques et il n'est pas déraisonnable par exemple d'envisager, à moyen terme, la production en République Populaire du Congo de ferro-manganèse, ferro-silicium, silico-manganèse, carbure de calcium. Le minerai serait d'abord gabonais, puis ultérieurement congolais. L'usine pourrait se situer près de Loudima pour disposer de plantations d'Eucalyptus en vue de la fabrication de charbon de bois. Il faudrait pour cette usine 50.000 à 100.000 t/an de charbon soit environ 250 à 500.000 m³ de bois. Il faudrait également disposer d'énergie électrique à un coût très bas, de l'ordre de 1 F CFA/KWH, ce qui impliquerait la réalisation des grands projets hydroélectriques prévus au Congo et la mise en place d'un réseau de distribution à longue distance.

Des possibilités similaires, mais encore mal définies, existent probablement au Zaïre. L'aménagement d'une unité métallurgique en République Populaire du Congo et au Zaïre pourrait donc être envisagé mais nécessiterait au préalable de nombreux travaux d'une durée de plusieurs années.

AUTRES POSSIBILITÉS D'UTILISATIONS INDUSTRIELLES

Il existe théoriquement d'autres possibilités d'emploi du charbon de bois tropical dans des industries diverses. Bien que ces perspectives semblent peut-être moins favorables dans un avenir immédiat et qu'aucune étude n'ait été effectuée au C. T. F. T. dans ce sens, il a semblé, tout de même, intéressant de les citer ici.

EMPLOI DANS L'INDUSTRIE DE LA CHAUX ET DU CIMENT.

Le charbon de bois peut être mélangé avec de la pierre à chaux et brûlé pour obtenir de la chaux vive. On peut aussi pulvériser le charbon et l'utiliser, à la place du fuel, dans un four à ciment équipé

de brûleurs à injection. Le ciment est, en effet, obtenu en cuisant un mélange d'argile et de chaux à des températures élevées de l'ordre de 1.400 °C. La cuisson peut se faire au charbon pulvérisé ou au mazout. Le produit cuit, ou « clinker », est refroidi, puis broyé avec du gypse.

Un exemple d'emploi de charbon de bois tropical est fourni par une cimenterie ougandaise « Uganda Cement Industries » à Tororo qui a mis au point une technique de production de ciment Portland dans un four rotatif où l'on brûle du charbon de bois. Des bois d'Eucalyptus, d'Acacias, de Pins tropicaux ainsi que des mélanges hétérogènes dans lesquels toutefois les espèces très riches en cendres avaient été éliminées, ont été utilisés avec succès. Il faut approximativement 250 kg de charbon de bois pour fabriquer 1 tonne de ciment. Les caractéristiques du charbon doivent être les suivantes :

- faible teneur en cendres (moins de 4 %),
- faible teneur en humidité (moins de 4 %),
- fort pourcentage de matières volatiles (de l'ordre de 20 %) pour assurer une bonne inflammabilité.

PRODUCTION DE CHARBON ACTIF.

Le charbon actif peut être préparé à partir de différentes matières premières : bois, os, déchets de papeterie (liqueurs noires), coques de noix de coco, tourbes, houille, résidus pétroliers, etc... Les charbons compacts et denses du type anthracite ne sont toutefois pas recommandés, dans ce cas. Le charbon non activé est un produit relativement inerte ayant une surface spécifique assez faible (1 à 2 m²/g). Le charbon se présente alors sous une forme cristalline irrégulière dans laquelle les interstices sont remplis de carbone amorphe bloquant les cavités. L'activation consiste à éliminer ces substances amorphes et à augmenter la surface spécifique interne qui peut aller, selon le traitement, de 300 à 2.500 m²/g.

La fabrication de charbon actif peut se faire en un ou deux stades selon que la technique d'activation est appliquée directement sur le bois (ou toute autre matière première avant carbonisation) ou sur du charbon. Dans le premier cas, il s'agit d'activation chimique (effectuée en imprégnant le matériau « cru » avec des composés tels que chlorure de zinc, acide phosphorique, carbonates, sulfocyanures, etc...) ; dans le second, d'activation physique réalisée sur du charbon porté à température élevée (800 à 1.000°) à l'aide d'un courant de gaz (vapeur d'eau, gaz carbonique, etc...).

La fabrication de charbon actif est donc plus complexe que celle d'un charbon de bois destiné

à des usages plus courants. Elle demande, de plus, des investissements plus importants et elle fait appel à une technicité plus élevée. Elle serait donc plus difficilement réalisable en pays tropical. Elle peut cependant avoir un certain intérêt car le charbon actif représente un produit commercialisable sur un marché extérieur. La demande en charbon actif croît actuellement de 5 à 10 % par an dans les pays développés du fait de l'importance accordée aux problèmes de pollution et d'épuration pour lesquels on utilise ce matériau comme fixateur de gaz, absorbeur de liquide ou produit de filtration. Enfin, le prix de vente du charbon actif préparé à partir du bois est, selon la qualité, cinq à dix fois plus élevé que celui d'un charbon de bois normal.

CHARBON POUR L'INDUSTRIE DU CAOUTCHOUC.

On peut enfin penser à une autre éventualité d'emploi du charbon tropical, bien qu'aucun essai n'ait encore été effectué dans ce sens, c'est son utilisation dans l'industrie du caoutchouc.

Le caoutchouc naturel est principalement constitué par un hydrocarbure non saturé, polymère de l'isoprène. Il fut extrait initialement en très petites quantités par excision de plusieurs espèces de la forêt naturelle (arbres ou arbustes) en particulier les Ficus et les Hévéas. Très rapidement, des plantations d'espèces à caoutchouc furent expérimentées et se développèrent au cours du 19^e siècle à partir d'*Hevea brasiliensis*, en Inde, à Ceylan, en Indochine, au Brésil.

Actuellement le caoutchouc de plantation est fortement concurrencé par les élastomères de synthèse, produits à partir du butadiène ou du styrène dérivés du pétrole, qui correspondent à une proportion comprise entre les 2/3 et les 3/4 de la production totale de caoutchouc.

Le caoutchouc est rarement utilisé à l'état brut. Dans la plupart des cas, il est additionné d'éléments permettant de préparer des mélanges vulcanisables, d'améliorer sa résistance à la traction et de les teinter. L'un de ces additifs est du « noir de carbone » ajouté à raison de 30 % (50 parties pour 100 parties de caoutchouc) qui se présente sous la forme d'une poudre très fine ayant une surface active de l'ordre de 100 m²/g et contenant moins de 0,5 % d'humidité. Ce « noir de carbone », produit à partir de dérivés pétroliers, est actuellement commercialisé, pour sa plus grande part, par une société américaine.

On ignore si du charbon de bois préparé dans des conditions spéciales et finement pulvérisé, pourrait convenir comme produit de remplacement. Mais, des essais dans ce sens pourraient être envisagés avec profit.

CONCLUSION

Après une mise en sommeil de plusieurs décennies, la carbonisation des bois connaît à l'heure actuelle, même pour les pays industrialisés, un regain d'intérêt d'autant plus que les bois représentent une matière première renouvelable. Il serait utile de reprendre ou de poursuivre les recherches sur ce sujet en particulier dans le cas des bois tropicaux. On aurait ainsi le moyen de contribuer au développement de certains pays sous-industrialisés :

— par l'implantation d'unités électriques produisant de l'énergie à bon marché à partir des forêts locales.

— par la création éventuelle d'une industrie sidérurgique dans les régions possédant des gisements miniers.

Les recherches devraient se développer en vue de l'utilisation d'essences de reboisement et de l'utilisation de la forêt naturelle.

Les essences de reboisement présentent l'avantage de fournir une matière première homogène et bien définie. Il est d'ailleurs possible de sélectionner, à la suite d'études sylvicoles et techniques,

des espèces possédant des qualités particulières satisfaisantes telles que la densité ou la teneur en matières minérales et des sites intéressants en ce qui concerne la nature du sol ou la proximité d'une zone industrielle.

L'utilisation de la forêt naturelle peut poser quelques problèmes du fait de son hétérogénéité. Toutefois, rien ne permet d'affirmer que l'emploi des bois en mélange soit impossible. Un simple classement des essences en bois de faible ou forte densité serait d'ailleurs suffisant pour améliorer les mélanges ; les bois lourds seraient réservés à la fabrication de charbon résistant et les bois légers à la production d'énergie.

Le C. T. F. T. souhaite s'engager dans la voie de ces recherches en procédant dans un premier stade, à des tests de laboratoire pour la fabrication de charbon puis dans un deuxième temps à des essais semi-industriels seule échelle valable pour l'étude de la production d'énergie. Ces travaux nécessiteront évidemment du temps et des crédits mais l'enjeu semble suffisamment intéressant pour qu'un effort soit fait dans ce sens.

Chantier de carbonisation dans les Landes. Fours démontés.

Photo J. Doat.

