

*Plantation d'Eucalyptus platyphylla F 1
âgée de 7 ans — Congo.*

Photo Bianchi.

LES BOIS TROPICAUX, SOURCE POTENTIELLE D'ÉNERGIE

par Jacqueline DOAT

*Ingénieur à la Division Cellulose
et Chimie du Centre Technique Forestier Tropical.*



SUMMARY

TROPICAL WOODS, A POTENTIAL SOURCE OF ENERGY

Energy is a factor essential to the development of mankind, and world energy consumption is growing very rapidly. But the recent oil crisis has led governments to seek multiple sources of energy in order to diversify their energy supplies and reduce their dependence on petroleum products.

After reviewing traditional forms of energy and new sources of energy, the author deals with the possibilities of treating the biomass in general, and wood in particular, for energy purposes : burning, carbonization, gasification, hydrolysis, fermentation, chemical synthesis, etc. Tropical forests, which account for about half the world's wooded surface, together with plantations of fast-growing tropical species, constitute a very valuable potential reserve of energy.

LAS MADERAS TROPICALES, FUENTE POTENCIAL DE ENERGÍA

La energía constituye un factor primordial del desarrollo de la humanidad y el consumo energético mundial aumenta con suma rapidez. No obstante la reciente crisis del petróleo ha conducido a los Estados a investigar, con objeto de disminuir su dependencia en relación con los productos petroleros, las fuentes de energía múltiples destinadas a dar mayor diversidad a sus abastecimientos.

Tras haber examinado sucesivamente las energías convencionales y las nuevas fuentes de energía, se exponen en este artículo las posibilidades de tratamiento de la biomasa en general (y en particular de la madera) persiguiendo en ello un objetivo energético: combustión, carbonización, gasificación, hidrólisis, fermentación, síntesis de los productos químicos, etc. Los bosques tropicales, que corresponden aproximadamente a la mitad de la superficie arbolada del globo, así como las plantaciones de especies tropicales de crecimiento rápido, pueden constituir una reserva de energía potencial sumamente interesante.

INTRODUCTION

L'énergie est un facteur essentiel du développement de l'humanité. Si l'on a pu dire que le niveau de civilisation technique d'un pays pouvait s'apprécier en considérant sa consommation de papier *per capita*, il était aussi vrai de penser jusqu'à ces dernières années, que les dépenses en énergie électrique d'un Etat permettaient de même, de situer le niveau de vie moyen de ses habitants. Ainsi, le Suédois et l'Américain consommaient annuellement en 1975 9.800 et 9.400 kWh, l'Allemand 4.700 kWh, le Japonais 4.200 kWh, le Français 3.500 kWh et l'Italien 2.500 kWh. La consommation énergétique mondiale croît depuis les temps les plus reculés. Mais cette augmentation est soumise à une accélération progressive. En effet, Alvin TOFFLER, l'auteur du « Choc du Futur », cite dans son livre les estimations suivantes : à partir de la naissance du Christ et pendant plus de 18 siècles, l'humanité a consommé en moyenne par an l'équivalent de 16 millions de tonnes de charbon. A partir de 1850, la consommation a augmenté sensiblement. Elle était, au début du siècle, de l'ordre de 700 millions de tonnes équivalent charbon par an ; elle se situe actuellement autour de 9 milliards de T.e.c. Comme ces estimations correspondent à des chiffres mondiaux, l'accélération est encore plus nette pour les pays développés. En fait, jusqu'à 1973-1974, les pays industrialisés à économie libérale pratiquaient une politique de

consommation dans tous les domaines qui allait de pair avec un certain gaspillage énergétique.

Mais la récente crise économique mondiale liée à de nombreux facteurs, en particulier à l'augmentation du prix du pétrole brut et à la raréfaction de son approvisionnement, a suscité de la part des pouvoirs publics et de la population une prise de conscience et un revirement d'attitude au point que certains auteurs en sont arrivés à parler de gaspillage zéro de l'énergie. On s'est aussi efforcé de substituer au pétrole d'autres sources d'énergie, soit en reconsidérant des sources anciennes plus ou moins abandonnées pour différentes raisons, soit en recherchant des sources d'énergie nouvelles, qui soient renouvelables, bon marché et non polluantes. A l'échelle de la France, la création d'un prix annuel de l'énergie visant à récompenser des chercheurs ayant fait preuve d'innovation dans ce domaine montre bien l'intérêt du pays pour ce sujet.

A l'heure actuelle, il suffit d'ailleurs d'ouvrir un magazine pour y trouver un article traitant de la pénurie de l'énergie. Malgré cela, il nous a paru intéressant de tenter de faire le point sur cette question et d'essayer de déterminer comment la forêt, en général, et les bois tropicaux, en particulier, pourraient être valorisés en apportant, parmi d'autres possibilités, une solution partielle aux problèmes énergétiques.

SOURCES D'ÉNERGIE TRADITIONNELLES

LE BOIS

Dans les sociétés primitives ou peu évoluées, les seules énergies utilisées étaient l'énergie humaine

et animale (chasse, travail des champs) et l'énergie calorifique du bois (cuisson des aliments et lutte

contre le froid). Le bois (ainsi que le charbon de bois) est resté le principal combustible jusqu'au XIX^e siècle. Mais l'emploi du bois n'a pas résisté à la révolution industrielle et si l'on cite encore parfois les trains de São Paulo qui ont roulé jusqu'en 1958 avec des chaudières à bois, c'est bien parce qu'ils représentaient une anomalie. Jusqu'aux années trente, le bois a cependant permis

le chauffage de nombreux foyers européens et pendant le conflit mondial de 1939 à 1945, de nombreux véhicules ont été équipés de gazogènes pour pallier le blocus de produits pétroliers. Enfin, la vogue des résidences secondaires et des « barbecues parties » a entraîné une extension de l'emploi de charbon de bois qui est aussi utilisé par ailleurs, par les industries métallurgiques.

LE CHARBON

Le bois a fait place à d'autres matières premières provenant principalement de ressources fossiles. Il s'agit tout d'abord du charbon de houille. Les ressources mondiales totales en charbon sont importantes ; selon les sources, les estimations varient entre 2.300 milliards de tonnes prouvées et jusqu'à 17.000 milliards de tonnes possibles. Le charbon est inégalement réparti à la surface du globe. On trouve, en effet, en U. R. S. S., aux États-Unis et en Chine les 2/3 de ces réserves. L'Europe possède moins de 100 milliards de tonnes et la

France seulement 500 millions de tonnes. Après les années 1950 le charbon a été peu à peu supplanté par le pétrole dont les coûts étaient alors favorables. Mais depuis l'augmentation de celui-ci, un regain d'intérêt se dessine pour le charbon. D'anciennes mines fermées depuis des années ont été réouvertes pour l'approvisionnement de centrales électriques. On s'est même intéressés récemment aux possibilités de récupération du carbone résiduel des terrils du Nord.

LE PÉTROLE

Le pétrole est le carburant le plus utilisé. C'est lui qui sert souvent « d'étalon » comme source d'énergie. Ainsi, la valeur énergétique des autres carburants est estimée souvent en t. e. p. (tonnes équivalent pétrole). Citons, par exemple, qu'une tonne de charbon correspond à environ 0,67 t. e. p. et une tonne de bois sec à la moitié de ce chiffre. Les réserves mondiales de pétrole sont plus faibles que celles de charbon puisqu'elles sont de l'ordre de 90 milliards de tonnes connues. Comme pour le charbon, on observe une forte inégalité de la répartition, certaines régions du Moyen-Orient étant très riches en pétrole alors que d'autres pays (tels l'Australie, le Japon) en manquent totalement. La France produit annuellement 1,2 million de tonnes de pétrole. Il est bien connu qu'elle doit importer une grande part de sa consommation. Aussi, avant même les restrictions de 1974, la France a-t-elle toujours été très attentive à tirer un parti maximum du pétrole par l'augmentation sensible des rendements des

centrales thermiques. Les bilans énergétiques ont été nettement améliorés en vingt ans : alors qu'il fallait en 1952-1954, 460 g de fuel pour produire 1 kWh, il n'en faut plus que 220 à 240 g actuellement. Ces résultats placent la technique française à un niveau très élevé, supérieur même dans ce domaine à celui des U. S. A. et de l'Allemagne.

Les recherches visant à découvrir de nouveaux gisements sont très poussées dans le Monde. Après l'Alaska, le Mexique, les profondeurs des océans sont sondées. Les forages off-shore ont été positifs en ce qui concerne la mer du Nord, le golfe du Gabon, l'Indonésie, etc... Les grandes sociétés pétrolières mondiales demeurent très actives de ce point de vue.

D'autre part, on envisage également d'extraire les sables asphaltiques et les argiles bitumineuses qui existent en très grandes quantités dans le monde (Alaska ou Colorado par exemple) pour en obtenir de précieux composés.

LE GAZ

Le gaz naturel est d'emploi un peu plus récent. Les pays les plus riches sont l'U. R. S. S., le Moyen-Orient, les États-Unis et les Pays-Bas. Les réserves mondiales sont de 63.000 milliards de m³ et repré-

sentent 50 milliards de t. e. p. La France produit actuellement 7,5 milliards de m³ mais ses réserves s'épuisent rapidement. Elle importe actuellement du gaz d'Algérie, de Hollande et d'U. R. S. S.

L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE

L'énergie hydraulique a été appelée la houille blanche. La moitié du potentiel mondial des ressources hydrauliques se trouve en Afrique et en Amérique Latine car ces continents possèdent de nombreux bassins fluviaux, la plupart très importants. Certains investissements ont été faits avec l'aide de crédits internationaux (au Zaïre, au Cameroun, au Brésil, etc...). Toutefois, comme les den-

sités de consommations électriques sont souvent faibles, on est loin d'exploiter la totalité du potentiel hydroélectrique de ces régions du globe. Actuellement, l'hydraulique fournit 5 % environ des besoins énergétiques mondiaux. En Europe, ce type d'énergie correspond à 8 % de la production. L'équipement des cours d'eau de l'ouest européen est d'ailleurs proche du maximum.

ÉNERGIES NOUVELLES

Les principales sources d'énergie traditionnelle sont donc des matières premières d'origine fossile. Ces produits sont consommés jour après jour et les réserves s'amenuisent. Ainsi, on estime qu'au rythme actuel les réserves des gisements de charbon correspondent à 250 ans, celles des puits de pétrole à 35 ans, celles des poches de gaz naturel à 45 ans environ. En avril 1977, le Président CARTER déclarait officiellement que si de profonds changements n'intervenaient pas, dès 1980, les besoins de la consommation mondiale de pétrole seraient supé-

rieurs à la production. Pour sa part, Th. de MONTBRIAL dans « L'Énergie : le compte à rebours » prévoit qu'une catastrophe aura lieu dans 20 à 30 ans. Situait pour 1977, la consommation mondiale de pétrole à 3 milliards de t/an, il confirme que l'épuisement des nappes sera probable vers l'an 2000 d'autant que certaines nations du tiers monde entreront alors dans le monde industrialisé. Il sera donc nécessaire de faire appel à d'autres matières premières ou d'autres procédés dont certains sont déjà connus et d'autres restent à découvrir.

L'ATOME

Les ressources totales du globe en uranium ne sont pas encore connues car l'U. R. S. S., la Chine et les pays de l'Est en général ne fournissent pas de chiffres à ce sujet. Le monde occidental serait actuellement assuré de 1.800.000 t d'uranium mais on peut espérer doubler environ ce chiffre. Quatre pays détiennent la moitié des ressources prouvées : les Etats-Unis, le Canada, l'Afrique du Sud et l'Australie. La France en possède 53.000 t, soit pour le moment 0,03 % des réserves mondiales.

Les prévisions de consommation d'énergie au cours des cent prochaines années accordent la primauté au nucléaire (60 % de la totalité).

Actuellement les techniques sont basées sur la fission de noyaux lourds sous un bombardement de neutrons. L'uranium naturel contient 0,7 % d'uranium 235 et 99,3 % d'uranium 238. L'uranium enrichi artificiellement (2 à 4 % d'uranium 235) fournit plus de neutrons que l'uranium naturel. Les neutrons produits sont ralentis par des modérateurs afin de réunir les conditions d'une réaction en chaîne régulière. La chaleur libérée au sein du combustible est évacuée hors du cœur du réacteur par un fluide ayant des caractéristiques spécifiques (capacité et conductivité calorifique élevées,

non corrosion du réacteur, faible affinité de capture des neutrons). Les modérateurs courants sont le graphite, l'eau ordinaire ou l'eau lourde ; les fluides peuvent être du gaz carbonique, de l'eau, du sodium, de l'hélium, de l'eau lourde, des liquides organiques, etc... Les principales filières exploitées actuellement sont :

— les réacteurs à uranium naturel — graphite — gaz carbonique (réacteurs français de Saclay, Chinon, St-Laurent des Eaux, filière Magnox de Grande-Bretagne) ;

— les réacteurs à uranium enrichi — eau ordinaire. L'eau sert de modérateur et de fluide caloporteur ; elle est soit bouillante : BWR, soit sous pression : PWR (Cadarache-Chooz) ;

— les réacteurs à eau lourde. L'eau lourde est le meilleur modérateur. On peut utiliser l'uranium naturel (l'eau lourde est alors modérateur et caloporteur) ou l'uranium enrichi (l'eau lourde est seulement modérateur, le fluide est du CO₂ ou de l'eau ordinaire).

Deux autres filières en sont au stade des études ou en début de construction. Elles donnent des rendements supérieurs. Ce sont :

— les réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides : les combustibles sont l'uranium enrichi et le plutonium et le fluide le sodium ou les sels fondus (Phenix de Marcoule et Creys Maleville) ;

— les réacteurs à haute température : combustibles : uranium enrichi et thorium, modérateur : graphite et fluide de refroidissement : hélium. Des programmes de développement de cette technique sont lancés en Angleterre, en Allemagne et surtout aux U. S. A.

L'énergie nucléaire offre des avantages certains du point de vue du prix de revient particulièrement compétitif. Mais elle peut présenter quelques dangers pour la flore et la faune aquatique et l'opinion publique reste sensibilisée aux problèmes de traitement des déchets et aux risques de catastrophes

LE SOLEIL

Le soleil a été le moteur des plus anciennes civilisations, adoré comme Dieu par les Incas ou l'ancienne Egypte ; il fut ensuite considéré comme un moyen et utilisé dans la mesure des connaissances de l'époque. Des miroirs reflétant la lumière du jour ont été utilisés pour la construction de l'intérieur des pyramides. Archimède voulant incendier la flotte ennemie assiégeant Syracuse, braquait ses miroirs sur les bateaux de bois. Plus tard, LAVOISIER construisit le premier four solaire. Et l'on assure qu'au début du siècle, un américain réussit à faire fonctionner en Egypte une pompe à eau alimentée par des miroirs solaires. Cette source d'énergie connaît aujourd'hui une certaine faveur de la part du public car elle apparaît inépuisable (parce que le soleil durera autant que l'espèce humaine), propre, non polluante et enfin disponible, sans possibilité d'appropriation par les autres pays du globe. Toutefois, l'énergie solaire est difficile à capter, à conserver et à stocker.

Actuellement, l'emploi de l'énergie solaire pour la fourniture d'eau chaude et pour le chauffage domestique commence à se répandre, particulièrement dans les pays méditerranéens : Israël, Algérie. En France, quelques maisons solaires individuelles viennent d'être édifiées au Havre, dans le Gard ou le Roussillon. A Paris même, on commence à voir quelques immeubles où l'eau chaude est assurée par les radiations du soleil. Dans certains pays tropicaux, le soleil fournit l'énergie nécessaire pour des stations de pompage de l'eau d'irrigation

accidentelles. Le bilan du nucléaire semble pourtant plutôt positif et de nombreuses nations devraient y recourir (par exemple l'Afrique du Sud).

Enfin, à très long terme le relais décisif du pétrole pourrait être assuré par la fusion thermonucléaire. Cette technique qui ne fait pas appel aux noyaux lourds mais à des éléments légers tel l'hydrogène, fait l'objet d'un grand effort de recherche. Toutefois cette énergie n'est pas encore contrôlée. L'échéance pour conquérir cette maîtrise est prévue pour 1985 au niveau du laboratoire. Comme il se passe généralement 20 ans entre la mise au point de laboratoire et la réalisation industrielle correspondante, cette énergie ne pourra donc pas être opérationnelle, dans la meilleure hypothèse, avant l'an 2000.

(Mali, Sénégal). Il est d'ailleurs prévu que la France, en association avec des sociétés américaines, mette rapidement en route une véritable industrie de production de cellules solaires.

Les réalisations concernant la conversion de l'énergie solaire en électricité restent encore de taille modeste, ainsi, les unités de MONT-LOUIS et d'ODEILLO dans les Pyrénées Orientales. On peut aussi indiquer que le groupe CETHEL (regroupant des industries et laboratoires français) a élaboré un projet de mise en route en 1980 dans le sud de la France d'une centrale d'une puissance d'un millier de kW alimentée par plusieurs centaines de miroirs mobiles placés sur une tour de 100 m de haut. Une unité de puissance analogue serait également réalisée prochainement dans le sud de l'Italie. Enfin, une usine de 1.500 kW sera mise en service cette année à Albuquerque (Nouveau Mexique). Actuellement, des études seraient engagées en France, à la suite d'un appel d'offres de la Délégation aux Energies Nouvelles, pour couvrir une gamme de puissances allant de 100 à 1.000 kW.

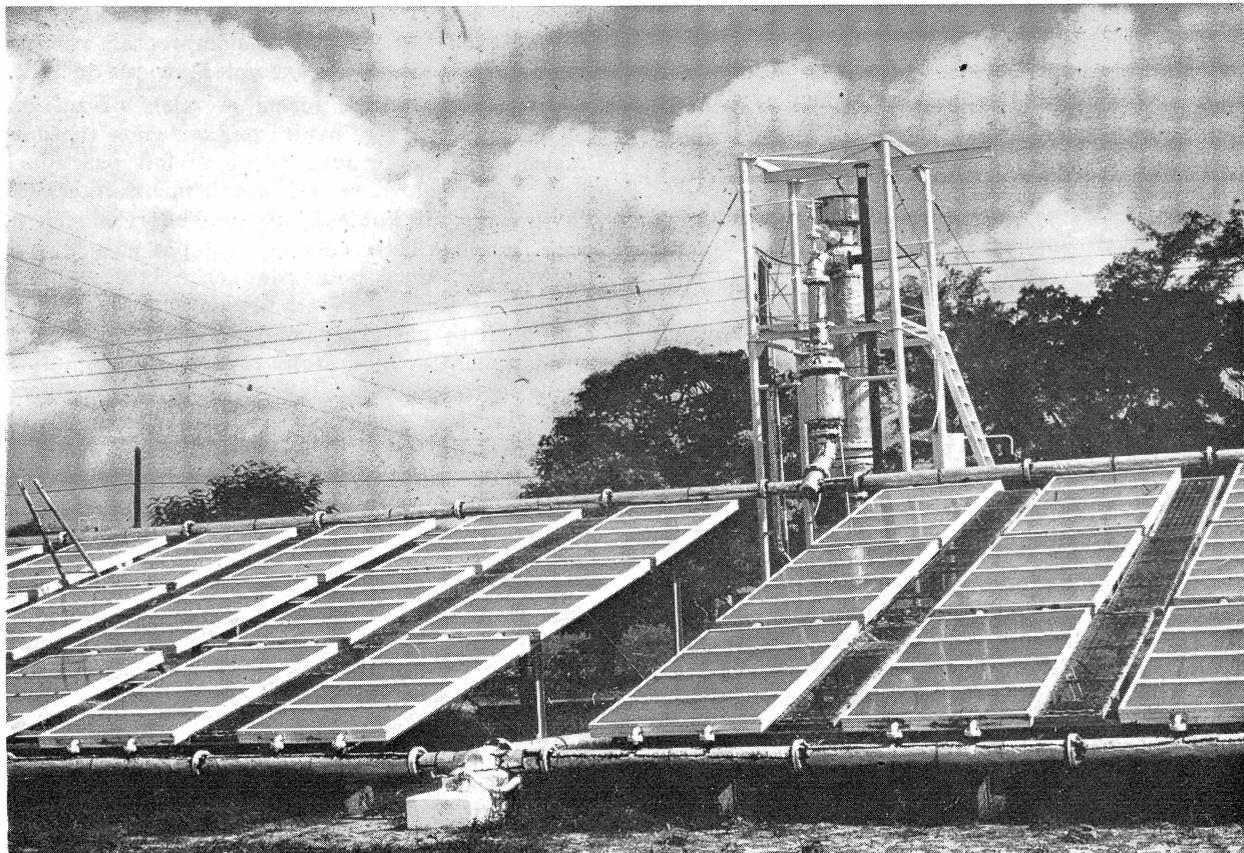
Il semble cependant que, pour les dix prochaines années, le bilan de l'énergie solaire soit moins favorable que celui du nucléaire car son exploitation à grande échelle pose encore quelques problèmes. Des recherches qui peuvent être longues et onéreuses, sont effectuées dans ce sens ; les résultats de ces travaux s'avéreront certainement intéressants pour l'avenir.

L'ÉNERGIE GÉOTHERMIQUE

Les sources d'eau chaude ont été jusqu'à présent utilisées le plus souvent pour le thermalisme. Elles peuvent aussi servir de source d'énergie.

L'énergie géothermique peut être employée de deux façons différentes :

— le chauffage d'appartements quand la tem-



*Capter l'énergie solaire, un impératif pour l'avenir du Sahel —
Pompe solaire expérimentale à Dakar (Sénégal) — 1976.*

Photo Ferlin.

pérature de l'eau est relativement basse (60-70°). C'est le cas d'un village du Massif Central ainsi que de certains chauffages d'immeubles de l'Ile-de-France (à Melun) ;

— la production d'électricité à partir des nappes très chaudes. Certains pays utilisent la géothermie

de façon industrielle : l'Italie, la Nouvelle-Zélande, les Etats-Unis ainsi que quelques usines des Philippines et d'Extrême-Orient.

On admet, dans l'état actuel des connaissances, que l'énergie géothermique ne pourra assurer que 1 % des besoins mondiaux.

L'ÉNERGIE MARÉMOTRICE

De nombreux français connaissent l'usine marémotrice de la Rance dans le golfe de Saint-Malo, d'une puissance totale de 240.000 kW. Pour ce type d'énergie, les sites favorables sont assez peu fréquents ; il faut en effet que l'amplitude des marées soit importante (de l'ordre de

10 m) pour pouvoir exploiter la force des mers et des océans. On étudie, dans le monde, les endroits propices à ce type d'énergie en fonction des conditions locales : en U. R. S. S., l'usine expérimentale de KISLOGOUBSKAIA, en France le projet grandiose des îles CHAUSEY.

L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

La force du vent a été utilisée depuis longtemps : moulins à vent pour la mouture du grain, éoliennes pour le pompage de l'eau, l'irrigation (Sénégal,

Mauritanie, Niger) et même la fourniture de courant électrique en petites quantités. Cependant, le passage du domestique à l'industriel pose, dans ce cas

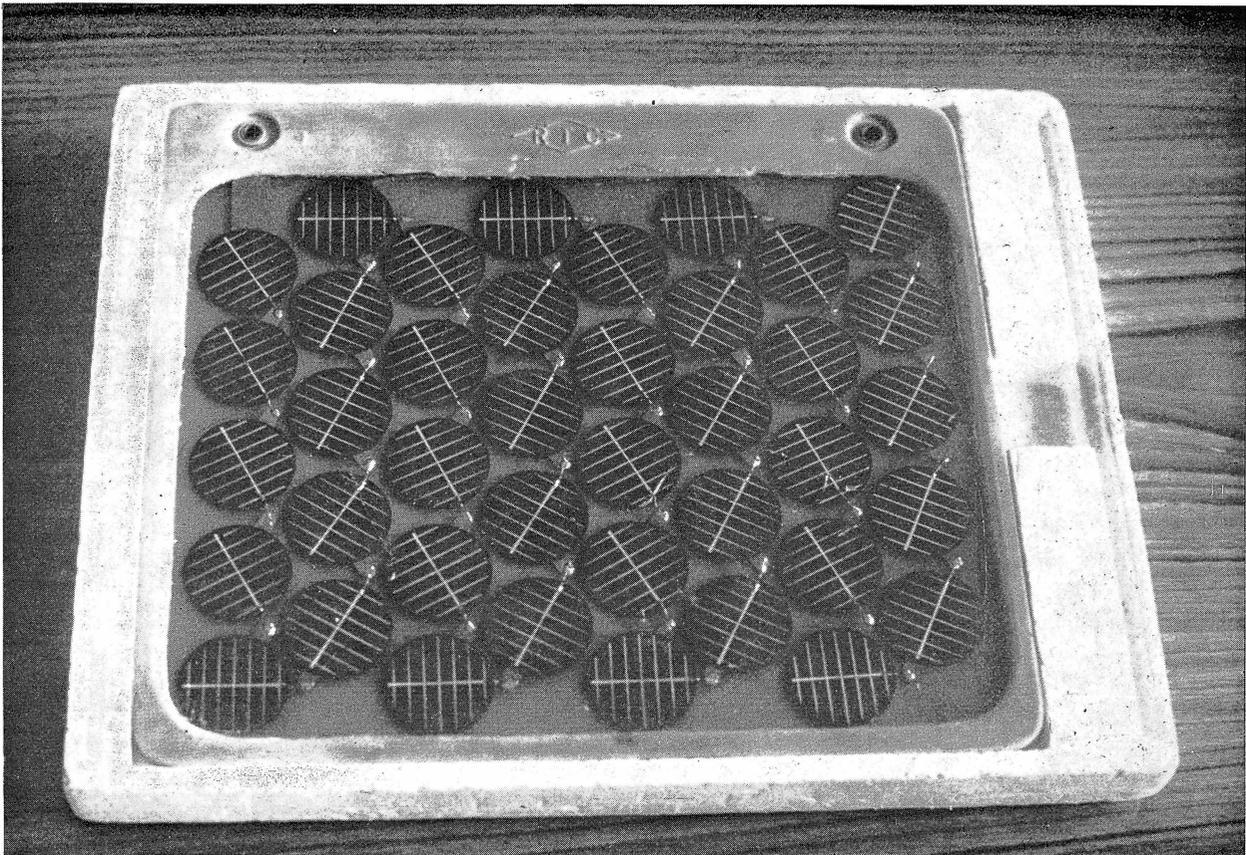


Photo Ferlin.

SÉNÉGAL — Cellules photo-voltaïques, les capteurs d'énergie solaire de demain.

aussi, de nombreux problèmes difficiles à résoudre. Tout d'abord, les vents situés dans la basse atmosphère sont le plus souvent irréguliers. Ensuite, l'appareillage constituant les aérogénérateurs est fragile et peu esthétique ; il est par ailleurs bruyant, ce qui pose des problèmes d'environnement.

Quelques essais ont eu lieu en France, au cours des 20 dernières années, avec des puissances de 800 à 1.000 kW. Mais, actuellement cette technique a été semble-t-il, abandonnée. Elle serait certainement plus valable pour des régions à vents réguliers (alizé, mousson, etc...).

LA BIOMASSE

La biomasse constitue enfin une source d'énergie potentielle très intéressante. Les forêts, les champs, les algues des mers utilisent et transforment l'énergie solaire et fabriquent annuellement 75 milliards de tonnes de matières vertes. Ces matières premières parfaitement renouvelables et écologiques, peuvent fournir théoriquement l'énergie qu'elles contiennent. Certains auteurs appellent d'ailleurs la biomasse, le « soleil vert » et écrivent que dans un proche avenir, les plantes remplaceront le pétrole.

Certaines plantes effectuent elles-mêmes la transformation de la biomasse et fournissent directement des composés de formule chimique plus ou

moins analogue à celle des composés pétroliers. Ainsi, l'Hévéa et les Euphorbes, en général, libèrent des latex constitués par des hydrocarbures plus ou moins lourds. D'autres espèces fournissent des exsudats résineux à fort pouvoir calorifique. Avant de parler « d'arbres à essence », il y a toutefois un long chemin à parcourir et de nombreuses études à accomplir.

Il existe aussi une algue, l'arabeena, qui serait susceptible de dégager de l'hydrogène (combustible intéressant) à partir d'un processus de décomposition de l'eau. Ce cas est cependant exceptionnel et la plupart des plantes forment surtout des glucides (telle la cellulose) utilisables bien sûr,

mais qui doivent subir pour cela des traitements physiques, mécaniques et biologiques.

Les plus grandes réserves de biomasse sont constituées par les forêts tropicales qui couvrent 15 % de la superficie utilisable du globe et qui correspondent à environ la moitié de la surface boisée sur la terre. Les possibilités d'emploi de ces forêts sont nombreuses et variées. Elles feront l'objet d'un chapitre spécial de cet article.

Enfin, il faut prendre en considération les déchets et résidus divers (provenant du bois, des résidus agricoles ou ménagers), souvent déconsidérés ou négligés, qui constituent des réserves importantes d'énergie et dont l'utilisation est « tout bénéfice » puisque ces produits ne sont pas valorisés dans la plupart des cas et constituent en plus un risque de pollution. On traitera également des possibilités d'emploi de ces déchets dans ce même chapitre.

ÉNERGIE A PARTIR DU BOIS

GÉNÉRALITÉS

La surface totale des terres émergées du globe est évaluée à environ 15 milliards d'ha. Si l'on ne tient pas compte de l'Antarctique et des mers, lacs et cours d'eau intérieurs, la superficie utilisable est de l'ordre de 13 milliards d'ha. Les forêts couvrent une partie importante des territoires mais les estimations de la surface boisée diffèrent selon les sources de 5.000 à 3.800 millions d'ha soit de 38 % à 29 % de la totalité (le chiffre F. A. O. est 30 %). Les forêts tropicales correspondent environ à 2,2 milliards d'ha.

Actuellement, moins de 1/6 de l'accroissement total forestier est récolté et utilisé pour l'industrie ou le bois de feu. Le potentiel théorique de matière première inemployée, donc disponible, semble important sur le plan mondial. Toutefois, comme pour les autres ressources, la répartition des forêts est très inégale. Les zones tropicales humides sont particulièrement favorisées de ce point de vue alors qu'à l'inverse dans les régions sèches, une utilisation poussée et anarchique du bois a fait parfois redouter une disparition des territoires boisés au profit du désert. Les pouvoirs publics des pays concernés et les organismes internationaux, sensibles à cet aspect de la question, ont mis à l'étude les possibilités de plantations nouvelles, de conservation et d'aménagement des forêts existantes pour la fourniture de bois de feu.

Enfin, même dans les régions à fort potentiel forestier, l'introduction d'essences destinées à la fabrication d'énergie est également examinée.

Le bois n'est pas à proprement parler une nouvelle source d'énergie puisqu'il a déjà été utilisé au cours des siècles passés. Mais, alors qu'il était tombé en désuétude, il est redevenu d'actualité dès l'apparition de la crise pétrolière, pour les pays industrialisés ne disposant pas de fuel.

Des organismes officiels ont été créés (citons par exemple pour la France la Délégation aux Energies Nouvelles qui attache une grande importance à la production d'énergie à partir des déchets de bois, pour les U. S. A. la « Energy Research and Development Administration » disposant de crédits importants). En ce qui concerne les Etats-Unis, la Mitre Corporation, en association avec la Georgia Pacific Corporation, a publié récemment un énorme rapport en six volumes faisant la synthèse des connaissances actuelles sur le bois source d'énergie, sans toutefois tirer de conclusions définitives. Depuis ces dernières années, des chercheurs américains, australiens, néo-zélandais, français et autres ont écrit des textes traitant des problèmes techniques et économiques propres à la fabrication d'énergie à partir du bois ou des déchets. Une bibliographie non limitative de ces articles est donnée en fin d'article. La division Cellulose et Chimie du CENTRE TECHNIQUE FORESTIER TROPICAL, qui s'intéresse particulièrement à l'énergie potentielle des bois, a effectué pour sa part des travaux sur l'hydrolyse, la carbonisation, la pyrolyse, le pouvoir calorifique et les possibilités énergétiques des essences tropicales.

OBTENTION D'ÉNERGIE PAR COMBUSTION DU BOIS

La technique la plus simple d'utilisation du bois pour la production d'énergie est la combustion. Le bois anhydre peut fournir selon sa nature, 4.200 à 5.000 kcal/kg. Mais cette quantité de chaleur,

qui correspond au pouvoir calorifique supérieur (combustion à volume constant et condensation de l'eau formée), ne peut pas être totalement récupérée dans la pratique car la combustion s'effectue

à l'air libre et sur bois plus ou moins humide. On aura alors un pouvoir calorifique diminué de quelques 1.000 kcal/kg pour 15 % d'humidité et de l'ordre de 3.000 calories pour 50 % d'humidité. On a donc intérêt à sécher le bois chaque fois que cela est possible, à l'air libre ou à l'aide de séchoirs qui, à leur tour, consomment des calories.

Depuis l'apparition de la crise pétrolière, l'emploi du bois pour la fabrication de vapeur et d'électricité a conduit à envisager la mise au point de chaudières à bois dont la taille peut être très variable (de 500 kW à 150 MW). Des projets sont à l'étude et des sociétés industrielles importantes ont manifesté de l'intérêt pour les bois tropicaux provenant, soit de la forêt naturelle hétérogène, soit de déchets de scieries, soit de plantations spécialement édifiées dans ce but.

On peut citer, par exemple, plusieurs pays (tels la Nouvelle-Calédonie, la Côte-d'Ivoire, le Cameroun) qui envisagent de bâtir de petites unités ; la Guyane pour laquelle existe un projet d'édification de centrale électrique moyenne à partir de la forêt naturelle ; les Philippines qui prévoient à côté de l'installation de petites usines de moins de 1.000 kW, la construction d'unités de 25 et 75 MW

à partir de bois de plantations artificielles. En ce qui les concerne, les techniciens des Etats-Unis estiment que, pour une centrale à bois, une taille de 90 à 150 MW semble convenable.

Toutefois, les rendements énergétiques des centrales à bois sont évidemment différents selon qu'il s'agit d'usines modernes de puissance élevée ou de petits ateliers de quelques centaines de kW.

a) Cas des grandes centrales.

On admettra que le rendement de la transformation énergie calorifique-énergie électrique est de 35 % par analogie à celui enregistré pour les centrales thermiques au fuel. On sait qu'actuellement il faut environ 240 g de fuel pour produire 1 kWh. Comme le pouvoir calorifique du fuel est de l'ordre de 10.000, il faut donc 2.400 kcal pour 1 kWh. Le pouvoir calorifique du bois à 15 % d'humidité environ correspondant à 3.200-3.500 cal/g, 1 kg de bois pourra donc fournir 1,4 kWh.

D'autre part, comme une unité de 1 MW de puissance, tournant pendant une année, sans interruption, 24 h. sur 24 peut produire

CAMEROUN — Type de forêt au Sud de Yaoundé.

Photo Aubreville.



$24 \times 365 \times 1.000 = 8,76 \times 10^6$ kWh, il est aisé de calculer à titre d'exemple les quantités de bois théoriquement nécessaires pour des centrales de 25 MW et 100 MW.

Pour une puissance de 25 MW, il faudra donc 155.000 t par année de marche et pour une puissance de 100 MW, il en faudra 4 fois plus soit 620.000 t/an.

Ces chiffres correspondent toutefois à des estimations théoriques et peut-être « optimistes » car on a utilisé pour les calculs ci-dessus les rendements énergétiques obtenus par E. D. F. pour des centrales thermiques au fuel, modernes et puissantes. Par ailleurs, il est possible que la siccité du bois soit inférieure à l'hypothèse retenue. Les différences sont difficiles à chiffrer mais on peut admettre comme hypothèse basse de travail, que l'on obtiendra au moins 1 kWh/kg de bois (soit 25 à 30 % de moins que le calcul précédent). Il apparaît donc raisonnable de situer l'approvisionnement à un niveau un peu plus important soit environ 200.000 t/an dans le 1^{er} cas et 800.000 t/an dans le second.

Si ces tonnages sont fournis par une forêt naturelle hétérogène ayant par exemple 250 m³ de bois à l'hectare (soit 180 à 200 t de bois environ), il faudra abattre annuellement 1.000 à 1.100 ha pour l'usine électrique de 25 MW et environ 4.000 ha dans le cas d'une puissance de 100 MW.

Si l'on décide d'approvisionner en bois de plantations à croissance rapide, tel l'Eucalyptus hybride PF1 pouvant donner 40 m³ (ou 30 t de bois environ) par hectare et par an, il faudra disposer de 7.000 ha à 28.000 ha de plantations selon la capacité de l'usine (25 ou 100 MW).

Ces chiffres peuvent paraître élevés, ils ne sont tout de même pas irréalistes car il existe déjà dans certains pays, tel le Brésil, d'importantes surfaces plantées en Eucalyptus. De nouvelles plantations pourraient également être envisagées dans plusieurs régions tropicales.

Enfin, il est difficile dans l'état actuel des connaissances et sans connaître les résultats d'études techniques et économiques d'estimer le coût d'une telle industrialisation. Cette rentabilité dépend non seulement de la taille des usines et du coût des investis-

sements mais aussi et surtout des conditions locales : prix du bois rendu usine, prix du fuel ou de tout autre combustible employé à la production d'électricité, ressources hydrauliques de la région, problèmes de main-d'œuvre, etc... L'avenir dira quel choix peut être fait. Il convient cependant de souligner que le bois sera certainement utilisé comme source industrielle d'énergie au fur et à mesure de la raréfaction des ressources pétrolières car une tonne de bois permet de remplacer 1/3 à 1/4 de tonne de fuel et l'emploi d'un hectare de plantation tropicale d'essence à croissance rapide équivaut, chaque année, à l'économie de 5.000 à 7.000 l de pétrole soit une valeur approximative de 2.500 à 3.500 F.

b) Cas des petites unités.

Il faut également signaler que si les calculs précédents semblent applicables aux grandes unités, les estimations de rendement des petits ateliers de production limitée de vapeur et d'électricité ayant des capacités de 300 à 1.000 kVA sont moins favorables : 10 à 12 % seulement. Dans ces cas, l'alimentation de la chaudière est souvent assurée par des déchets provenant de scieries et ateliers divers de transformation du bois situés aux environs. Les déchets sont utilisés tels quels sans séchage et leur humidité est très élevée (parfois jusqu'à 50 %). Pour obtenir les 860 kcal nécessaires à la production de 1 kWh il faudra donc environ 4 kg de bois humide à 2.200 cal/g. Dans ce cas 1 kg de bois vert ne correspond plus qu'à 0,25 kWh et 1 kg de bois à 15 % d'eau à 0,4 kWh.

Malgré cela, ces petites unités dont les coûts FOB varient selon la taille de 5 à 10 millions FF apparaissent comme très utiles pour assurer l'électrification d'un village, d'une fabrique ou d'un atelier. Sur un plan local, elles permettent de plus une économie de devises car la valeur des déchets est souvent peu élevée sinon négligeable.

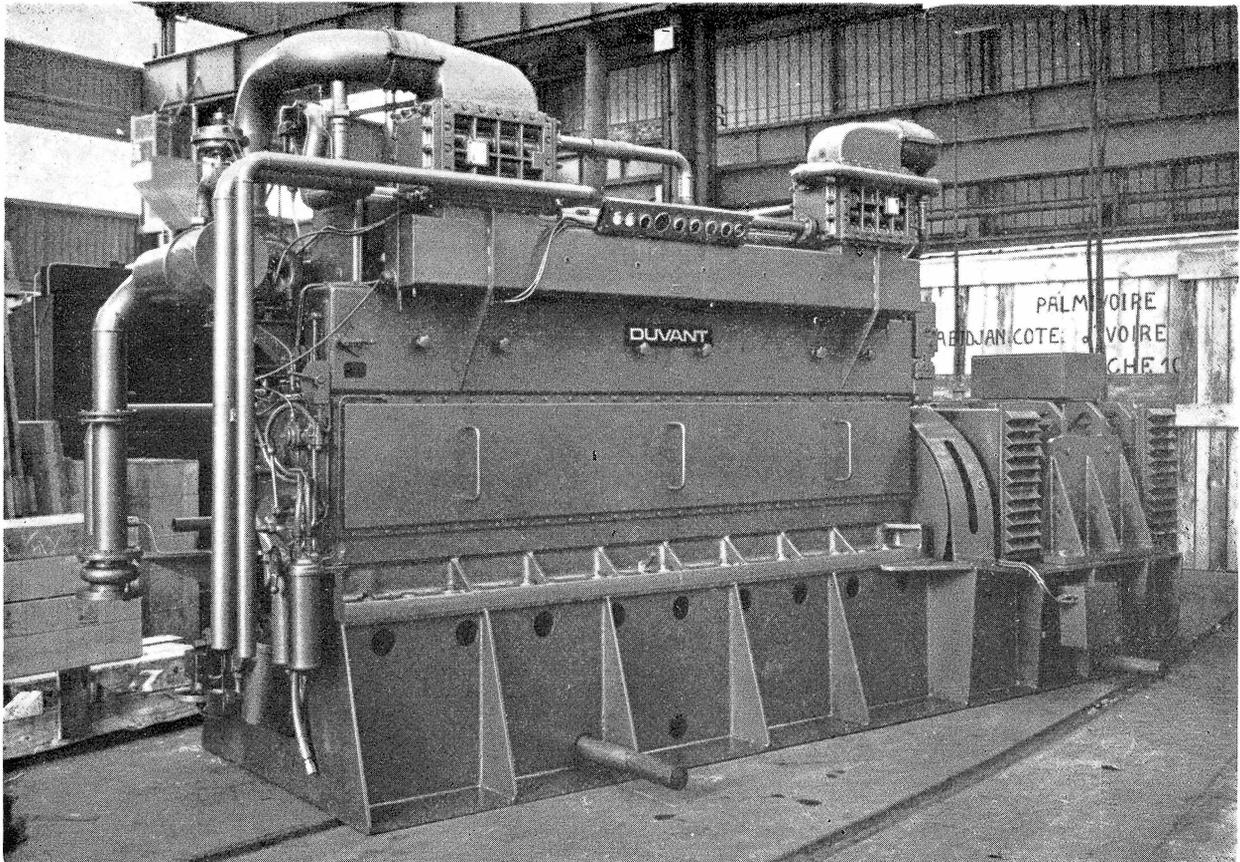
A titre d'exemple, on peut indiquer qu'une usine de 400 kW tournant 10 h par jour et 300 jours par an produirait 1.200.000 kWh/an et nécessiterait pour son approvisionnement 5.000 t de bois vert (ou 3.000 t de bois séché à 15 %) par année de marche.

CARBONISATION — GAZÉIFICATION

On peut également employer et valoriser le bois « au second degré » en effectuant un traitement préliminaire avant de passer à la fourniture d'énergie proprement dite. Ces traitements sont la carbonisation, la pyrolyse ou la gazéification du bois.

Le charbon de bois qui est le résultat d'une réduction des matières organiques sous des conditions contrôlées, peut être obtenu, selon la technique (artisanale ou industrielle) avec des rendements

allant de 20 à 35 % par rapport aux bois anhydres. Son pouvoir calorifique est de l'ordre de 7.000 à 7.500 kcal/kg. On obtient donc à partir d'un kilo de bois sec à l'air (équivalant environ à 3.500 kcal) 2.000 à 2.200 kcal en charbon soit un rendement énergétique bois/charbon de 55 à 60 %. La pyrolyse fournit d'autre part des jus pyrolygneux contenant des produits de valeur énergétique ou chimique intéressante, en particulier de l'acide



Groupe électrogène DUVANT de 800 KVA — 750 tours.

Photo Duvant.

acétique, du méthanol, de l'acétone, des acétates avec un rendement global de 4 à 8 % par rapport au bois suivant la nature chimique du bois employé ainsi que des phénols, crésols et des goudrons divers.

La carbonisation du bois forme enfin des gaz (environ 150 m³ par tonne de bois) dont la composition est fonction des conditions de réaction (température et durée de la pyrolyse). Ces gaz contiennent du gaz carbonique, de l'oxyde de carbone, de la vapeur d'eau, des hydrocarbures, de l'hydrogène.

Le pouvoir calorifique de ces gaz varie en fonction de leur composition. La valeur moyenne théorique serait de 2,5 kcal/m³ (1,2 kcal/m³ pour les gaz oxygénés et 4,8 kcal/m³ pour les hydrocarbures). Toutefois par suite de la présence d'air parasite, le pouvoir calorifique réel peut être nettement inférieur (1.300 kcal/m³ environ). On peut régler les conditions de la carbonisation et, en particulier, augmenter (au détriment du charbon et du pyrolygneux) le rendement en gaz. On peut aussi modifier la qualité et la composition des gaz en les crackant à température élevée par passage sur le charbon incandescent. Ces gaz enrichis peuvent être utilisés pour l'alimentation de moteurs de fonctionnement analogue à celui des Diesels, producteurs

d'électricité. En France, ce procédé de gazéification a été mis au point par de LACOTTE et repris avec quelques modifications, par la Société DUVANT qui commercialise, à l'heure actuelle, des moteurs Dual-fuel tournant à partir du gaz de bois avec un léger appoint de fuel. Il faut environ pour 1 kWh aux bornes d'un alternateur 25 ml de fuel domestique et 0,8 à 0,9 kg de bois anhydre (soit 1 kg de bois à 12-20 % d'humidité). Le rendement énergétique global est de l'ordre de 25 % (soit 35-37 % de rendement-moteur et 70-75 % de rendement gazéification). Les chiffres de rendement du moteur sont supérieurs à ceux des gazogènes classiques et des turbines à vapeur de capacité analogue. Les puissances fournies peuvent varier, à l'heure actuelle de 250 kVA à 1.400 kVA et l'investissement est de 800.000 F à 2.500.000 F (prix du four de gazéification + prix du moteur départ usine). Un système de ce type fonctionne déjà en Côte-d'Ivoire à partir de coques et de bourres de noix de coco. Cette technique semble intéressante car elle représente un progrès par rapport aux chaudières à bois de petite capacité produisant de la vapeur. Toutefois, l'emploi de sciures ou de bois en très petits fragments n'est pas recommandé du fait



Photo Roth-Hauser.

Déchets de bois déchetés avant le séchage pour gazéification dans des générateurs à gaz de bois.

des risques de bourrage des appareils de gazéification. La Société DUVANT effectue des études de mise au point de son appareillage pour l'adapter à ces matériaux. Actuellement, il est possible d'utiliser 15 à 20 % de sciures ou de plaquettes en mélange avec le bois d'approvisionnement habituel.

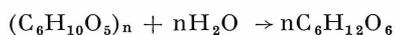
D'autres sociétés s'intéressent également aux problèmes de gazéification du bois. On peut citer par exemple, la Société ROTH (en Suisse), la Société TABEL (en France) qui commercialisent des générateurs à gaz de bois. Le CNEEMA a également étudié et mis au point avec la Société PILLARD un gazéificateur travaillant sur des matériaux fragmentés.

Enfin, les gaz de bois, recyclés par traitement à haute température sur catalyseurs peuvent fournir du « gaz de synthèse » de formule $\text{CO} + 2 \text{H}_2$,

utilisable pour la synthèse directe de l'alcool méthylique. Ce méthanol qui a un p. c. s. de 5.425 cal/g peut être utilisé comme source d'énergie et même comme carburant en mélange avec de l'essence dans des moteurs spéciaux. Pour fabriquer 1 t de méthanol selon cette technique, il faudrait 2,3 t de bois feuillu anhydre. Des experts canadiens et américains estiment que le prix de revient de l'alcool préparé par synthèse à partir des gaz du bois serait actuellement plus élevé que celui de l'alcool obtenu à partir du charbon, des produits pétroliers ou du gaz naturel (rapport de 1,5 à 1 environ). Toutefois, si le coût du fuel devait au moins doubler dans les 20 prochaines années et atteindre par exemple 25 \$ le barril en 1985 et 35 \$ le barril en 2005, le méthanol produit à partir de la biomasse du bois ou des déchets agricoles deviendrait alors compétitif.

HYDROLYSE ET FERMENTATION

L'hydrolyse consiste à transformer la cellulose et les autres polymères glucidiques en sucres simples selon les réactions



et



La lignine qui n'est pas attaquée par cette technique, constitue un déchet ou un sous-produit

L'hydrolyse peut être effectuée par des procédés chimiques ou enzymatiques.

La plupart des procédés chimiques utilisés dérivent de deux techniques basées sur l'emploi de solutions d'acides minéraux.

— Le procédé SCHOLLER : hydrolyse à chaud sous pression avec de l'acide sulfurique dilué (1 % environ).

— Le procédé BERGIUS : hydrolyse à température et pression ambiantes avec des acides très concentrés.

Parmi les autres procédés mis au point on peut citer les procédés HERENG et RHEINAU dérivant du procédé BERGIUS, la technique MADISON dérivant du procédé SCHOLLER.

Les hydrolyses utilisant les acides concentrés seraient les plus avantageuses car elles permettraient des rendements en sucres plus élevés et un meilleur bilan énergétique des unités de production. Ainsi le procédé BERGIUS-RHEINAU qui comprend une pré-hydrolyse avec du CIH à 35 % suivie d'une hydrolyse à CIH à 41 % donnerait un rendement en sucres de 63 % avec une dépense en CIH de 6 %, le tout par rapport au bois sec. Dans ce cas, l'hydrolyse des carbohydrates serait donc proche du rendement théorique maximum.

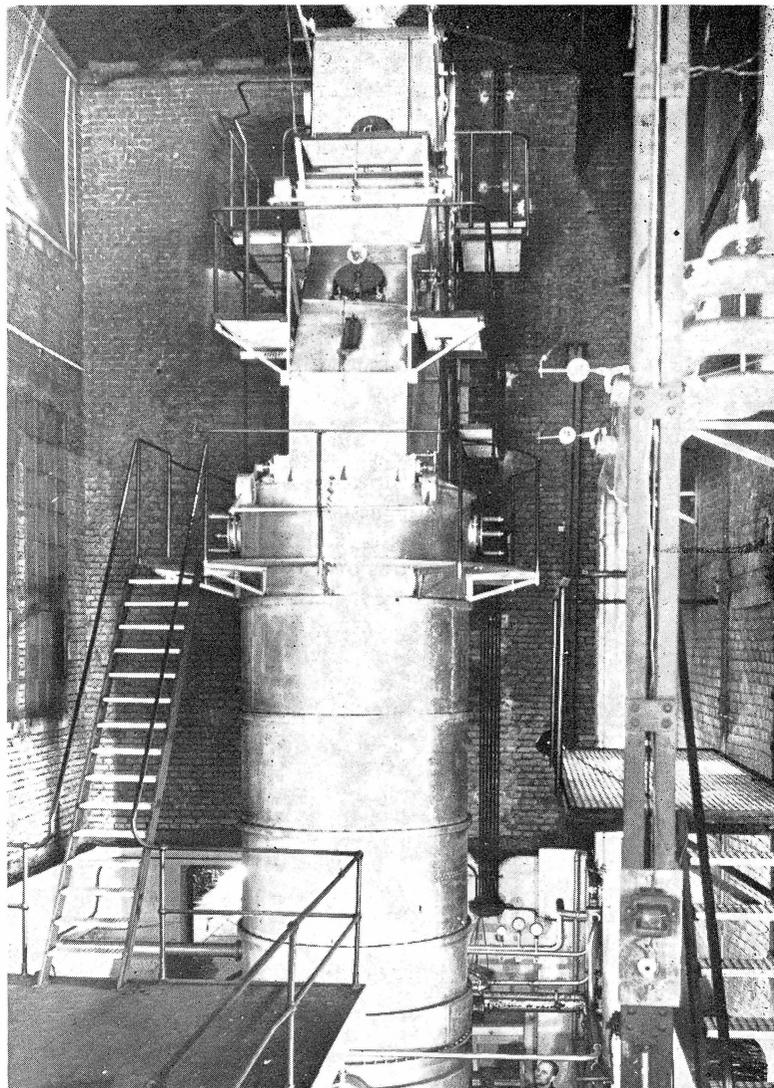
L'hydrolyse acide à SO_4H_2 dilué des bois tropicaux a été étudiée il y a de nombreuses années au C. T. F. T.

L'hydrolyse enzymatique de la cellulose de bois fait d'autre part l'objet de travaux de recherches approfondies et de recherches appliquées de la part de laboratoires allemands, suisses et surtout américains. L'attaque de la cellulose est assurée dans ce cas par des enzymes ou des bactéries.

Les jus sucrés formés à l'hydrolyse peuvent servir à la fabrication de levures (sucres en C_6 et sucres en C_5) pour un emploi alimentaire ou être fermentés et transformés en alcool éthylique. Dans ce dernier cas, seuls les sucres C_6 sont utilisables c'est-à-dire seuls les sucres provenant des hexosanes (cellulose). La fabrication de levures alimentaires semble donc plus intéressante du point de vue rendement puisqu'elle concerne tous les carbohydrates du bois. La transformation du bois en produits d'alimentation humaine ou animale très valables pour les régions de famine, ne représente toutefois qu'une source d'énergie au « second degré ». L'éthanol, par contre qui a un pouvoir calorifique de 7.100 kcal/kg peut être directement

utilisé comme carburant donc comme source d'énergie. Il faut 4,9 t de bois anhydre pour obtenir 2,1 t de sucre transformables en 1 t d'éthanol.

Si l'on admet que l'on peut produire 200 l d'alcool à la tonne de bois — 1 kg de bois contient en effet 40 à 45 % de cellulose qui peut être transformée en alcool avec un rendement moyen de 50 % (35 à 63 selon le procédé) — on peut en déduire qu'une forêt naturelle ayant un potentiel global de 200 t à l'hectare correspond théoriquement à 40.000 l d'alcool (ou environ 23 t. e. p.). De même, si l'hydrolyse est effectuée sur des bois de plantation, 1 ha de feuillus tropicaux à croissance rapide donnant un rendement de 30 t/ha/an permettra de produire 6.000 l d'alcool (ou environ 3,5 t. e. p.). Ce rendement est pratiquement double de celui que l'on obtient en France, à superficie égale, à partir de la betterave. Cependant, la pratique industrielle de transformation en alcool a montré qu'actuellement, pour fabriquer la valeur d'une thermie en alcool, il fallait dépenser plus d'une thermie pour la marche du processus, ce qui annule évidemment l'intérêt de cette technique, pour le moment du moins.



Générateur à gaz de bois, système Roth —
Capacité 1 500 000 Kcal/h.

Photo Roth Hauser.

MÉTHANISATION

Des recherches sont en cours pour déterminer les possibilités d'obtenir du méthane à partir des déchets cellulosiques. Il s'agit d'une extrapolation de recherches plus anciennes relatives à la méthanisation des fumiers porcins ou bovins contenant de la paille.

Dans le cas des fumiers pailleux, on abandonne la matière première dans des cuves closes et thermostatées pendant plusieurs semaines. A une température d'environ 35°, des réactions méthanogènes apparaissent après une période de latence plus ou moins longue au cours de laquelle se développe une microflore anaérobie. On peut accélérer le processus et réduire considérablement la période de latence en procédant à un ensemencement à l'aide de fonds de cuves résultant d'une opération précédente. La production de méthane mélangé à du gaz carbonique s'amplifie, passe par un maximum après trois ou quatre semaines puis décroît sensiblement après 6 à 8 semaines. Le déchargement des cuves en fin de réaction donne en supplément un engrais d'assez bonne qualité.

Le bilan énergétique d'une telle opération est très variable. A l'énergie obtenue sous forme de méthane il faut retrancher celle qui est dépensée pour stabiliser la température des cuves, particulièrement en hiver dans les régions froides, et celle qui actionne les pompes qui soutirent les jus en bas de cuve pour assurer vers le haut un arrosage permanent.

Dans de bonnes conditions, c'est-à-dire avec un excellent calorifugeage et un arrosage limité, voire sans arrosage, on peut espérer obtenir très approximativement, 4 thermies par jour et par m³ de cuve. Si l'on admet que la thermie est, actuellement en France, facturée aux particuliers aux alentours de 10 centimes, le revenu est donc d'environ 1.500 F par an et par m³ de cuve. Il n'est pas certain que ce chiffre permette, à l'heure actuelle, de couvrir d'une façon totalement satisfaisante l'amortissement du matériel et les frais de fonctionnement. C'est pourquoi les recherches se poursuivent afin d'améliorer le rendement énergétique de l'opération, en s'orientant de préférence vers une accélération du processus qui est actuellement jugé trop lent. La mise au point d'appareils continus représenterait également un progrès sensible.

Les recherches relatives à l'utilisation de nouveaux déchets cellulosiques, agricoles ou forestiers, sont trop récentes pour que l'on puisse formuler un pronostic valable. On peut, semble-t-il, traiter de la bagasse de canne à sucre, des déchets de bois très fractionnés comme de la sciure, mais l'on n'a pas encore abordé le problème des résidus de granulométrie plus importante. Il n'est cependant pas exclu qu'à plus ou moins long terme la méthanisation du bois représente une opération rentable particulièrement dans les zones du tiers monde privées d'infrastructure.

AUTRES POSSIBILITÉS

A côté de la combustion, de la carbonisation, de la gazéification, de l'hydrolyse, de la méthanisation, il existe d'autres techniques originales pour produire de l'énergie qui sont en fait soit des procédés mixtes soit des modifications ou améliorations des procédés existants. Dans cet ordre d'idées, on peut indiquer un nouveau procédé mis au point dans un laboratoire espagnol de Soria et breveté récemment, qui a été repris par une société française, consistant tout d'abord à faire subir à des déchets divers de bois ou à des écorces une fermentation en plusieurs stades alternés avec des phases d'agitation et de désintégration. Au cours de cette fermentation (qui

peut durer de 24 à 48 h) le matériau traité est séché du fait de la chaleur dégagée et sa mise à l'état de poudre est facilitée. Ce matériau est ensuite passé dans une presse qui fournit des granulés ou des plaquettes à faible teneur en eau qui peuvent être brûlés dans des foyers ou chaudières diverses. Cette technique est aussi applicable aux ordures et déchets ménagers.

On peut aussi citer, dans le domaine de la combustion ou de la gazéification des déchets ligneux, des essais d'emploi de lits fluidisés ou de salins fondus permettant de travailler en continu à des températures élevées.

CONCLUSION

La crise pétrolière mondiale a contraint de nombreux pays à rechercher de nouvelles sources d'énergie. Ainsi, l'énergie atomique est en train de se

développer dans la plupart des pays à haut niveau technologique. Un intérêt particulier est aussi porté aux sources d'énergie « douces » et écologiques

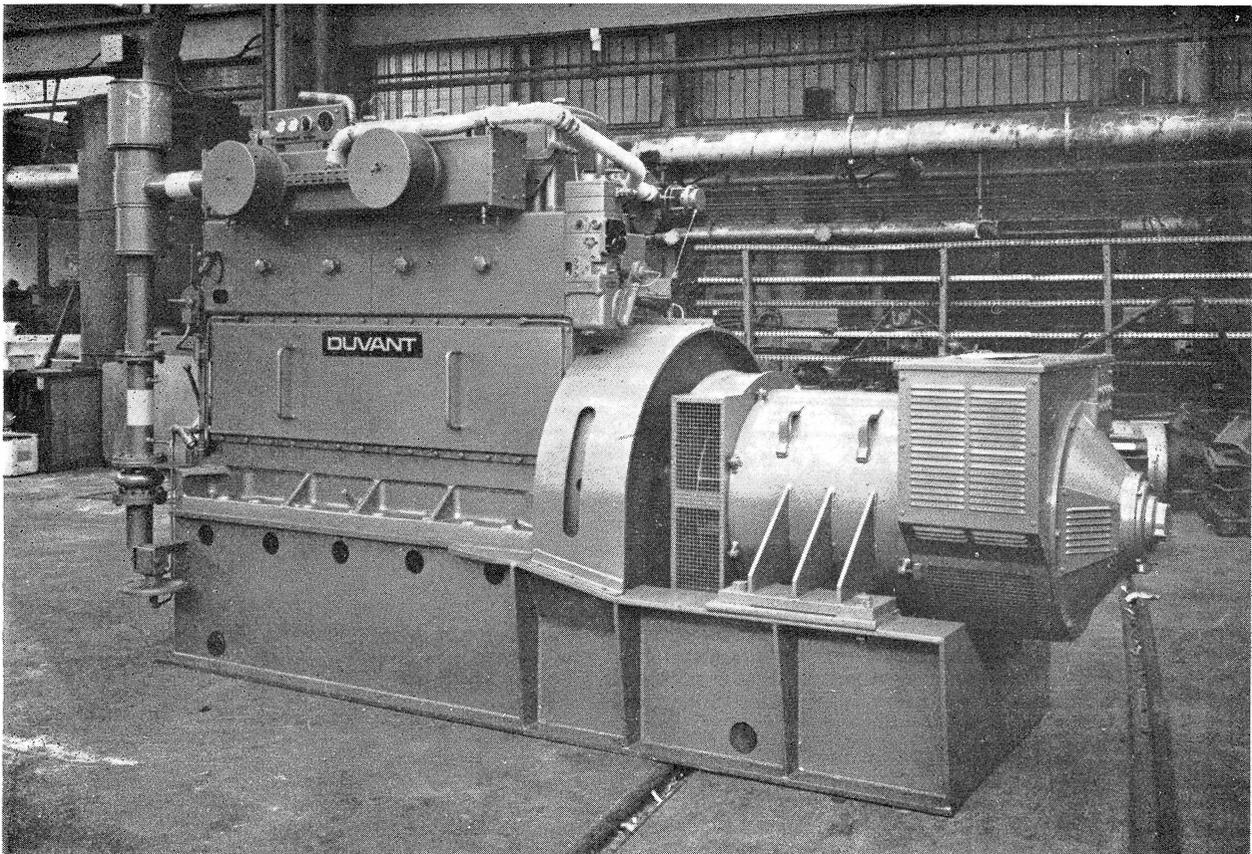


Photo Duvant.

Groupe électrogène DUVANT de plus faible puissance, 240 KVA — 750 tours.

(énergie solaire, géothermique, éolienne, marémotrice, etc...). Le bois, enfin qui a été jusqu'au siècle dernier, le carburant le plus utilisé mais qui était tombé en désuétude, redevient d'actualité. Dans les régions tempérées à industries développées, il existe bien des bois inemployés (tels que houppiers, souches laissées en forêt et déchets divers d'usines) mais le plus grand potentiel en bois utilisable pour la production d'énergie se trouve dans les régions tropicales qui possèdent d'importantes surfaces boisées et dans lesquelles il est aussi possible d'envisager des plantations d'essences à croissance rapide dans un but énergétique.

La production d'énergie peut être effectuée soit par combustion du bois et des déchets dans des chaudières spéciales de capacité variable, soit par gazéification directe du bois et emploi des gaz de bois pour la production d'électricité dans des moteurs de type dual-fuel ou pour la synthèse de méthanol, soit par carbonisation ou pyrolyse du bois (avec formation de charbon de bois, de produits pyrolytiques et de gaz). Le bois peut aussi être hydrolysé pour la fabrication d'alcool et

(ou) de levures utilisables dans l'alimentation animale et humaine. Enfin, les différents déchets cellulosiques pourraient fournir des hydrocarbures par méthanisation ou être traités également par des procédés mixtes (fermentation, dessiccation, agglomération) et transformés en briquettes ou granulés destinés à la combustion.

L'emploi de la biomasse ne prétend pas résoudre tous les problèmes liés à la pénurie d'énergie. Son utilisation peut malgré tout apporter des solutions très valables dans de nombreux cas et en particulier dans le cas de régions tropicales manquant de pétrole mais possédant d'importantes richesses inexploitées (forêt naturelle hétérogène) et dans lesquelles, d'autre part, il existe des possibilités de plantation d'essences à croissance rapide dans un but énergétique.

Enfin, par rapport aux sources d'énergies fossiles (qualifiées d'énergies mortes ou énergies cimetières par BERTRAND de JOUVENEL), la biomasse, renouvelable et parfaitement écologique, se présente comme une source vivante, propre et, à ce titre aussi, très intéressante pour l'avenir.

BIBLIOGRAPHIE

1. EARL (D. E.). — Forest energy and economic development, Clarendon Press, Oxford, 1975.
2. FOREST PRODUCTS RESEARCH SOCIETY, Madison. — Wood residue as an energy source. *Proceedings*, n° P-75-13, septembre 1976, Denver-Colorado.
3. PHYSICS AND ENGINEERING LABORATORY D. S. I. R., New-Zealand. — Symposium on the potentiel for Energy Farming in New Zealand. Novembre 1975, *Information series*, n° 117.
4. BATTELLE, Genève. — Bilans et perspectives en matière de valorisation des déchets celluloses et carbohydrates, résidus agricoles et agro-industriels. Séminaire PNUE/FAO, Rome, janvier 1976.
5. COUSINS (W. J.). — Recovery of energy from wood by pyrolysis and gasification. Report n° 555 D. S. I. R., New Zealand, octobre 1976.
6. ACTUEL DEVELOPPEMENT. — N° 19, mai-juin 1977. *Energies nouvelles* (soleil, biomasse, etc...).
7. ANDREN (R. K.), MANDELS (M. H.), MEDEIRAS (J. E.). — Production of sugars from waste cellulose by enzymatic hydrolysis. 8th cellulose conference T. A. P. P. I., Syracuse (N. Y.), mai 1975.
8. LA DOCUMENTATION FRANCAISE. — *Problèmes économiques*, *Energie*, n° 1552, décembre 1977.
9. NORMAN JENKINS. — Will biomass energy compete for forest raw materials ? *World Wood*, novembre 1977.
10. E. D. F. — L'Electricité en France, l'Energie dans le Monde et *Informations diverses*, 1977.
11. C. E. A. — *Notes d'information*, n° 4 (avr. 1975), n° 4 (avr. 1976), n° 6 (juin 1976).
12. ACTUALITÉS, DOCUMENTS. — L'énergie nucléaire, données techniques, économiques et écologiques. Délégation générale à l'information, avril 1975.
13. ANONYME. — Walnut wood-waste fires boiler to heat plant and dry kilns.
14. ANONYME. — On n'a pas de pétrole mais on a des déchets de bois. *Revue du Bois*, n° 12, décembre 1977.
15. HENNECKE (H.). — Cellulose hydrolysis. A contribution to the utilization of all cellulose resources. *Papier*, Darmstadt, 1970, 24 (1).
16. SAVARD (J.), ESPIL (L.). — Hydrolyse par percolation sulfurique de quelques bois tropicaux. Publication C. T. F. T., n° 2, 1951.
17. SAVARD (J.), ESPIL (L.). — Fermentation alcoolique de quelques bois tropicaux. Publication C. T. F. T., n° 3, 1951.
18. DOAT (J.), PETROFF (G.). — La Carbonisation des Bois Tropicaux. Essais de laboratoire et perspectives industrielles. *B. F. T.*, n° 159, janvier-février 1975.
19. DOAT (J.). — Le pouvoir calorifique des bois tropicaux. *B. F. T.*, n° 172, mars-avril 1977.
20. PÉTROFF (G.), DOAT (J.). — Pyrolyse des bois tropicaux. Influence de la composition chimique des bois sur les produits de distillation. *B. F. T.*, n° 177, 1978.
21. NIERAT (J. M.). — Une installation pilote de production d'électricité à partir du bois. *Revue du bois et de ses applications*, n° 10, octobre 1975.
22. MOODY (B. R.). — Advances in utilizing wood residue and bark as fuel for gas turbine. *Forest Products Journal*, vol. 26, n° 9, septembre 1976.
23. MORTON (F. L.). — In house generation of electricity from wood waste residue. *Forest Products Journal*, septembre 1976.
24. HAMMOND (V. L.), MUDGE (L. K.), ALLEN (C. H.), SCHIEFELBEIN (G. F.). — Energy from forest residuals by gasification of wood waste. *Pulp and Paper*, vol. 48, n° 2, février 1974.
25. LOAS (D.). — Procédé de fabrication de briquettes combustibles à partir de briquettes végétales. Brevet d'invention, 18 avril-5 juillet 1975.
26. MARSHALL (J. E.). — Large scale liquid fuel production from forest resource. Séminaire C. E. E./F. A. O., novembre 1978.
27. ZERBE (J. I.). — Production and use of wood-derived fuels (alcohols and woodgases). Séminaire CEE/FAO sur l'énergie. Novembre 1978.
28. ROTH (H. E.) and KELLER (M. C.). — Possible applications of stationary wood-gas generators system ROTH for energy production. Séminaire CEE / FAO sur l'énergie. Novembre 1978.

