

PROCEDES DE VALORISATION ENERGETIQUE
DE LA BIOMASSE A MADAGASCAR :
LA VOIE SECHE PAR L'UTILISATION DES
HUILES VEGETALES ET LA VOIE HUMIDE PAR
LES FERMENTATIONS ALCOOLIQUE ET
METHANOGENE (**)

P A R

L. MENET (**), E. M. GAYDOU (****)
et G. RAVELOJAONA (**)

I N T R O D U C T I O N

Les pays du Tiers Monde non producteurs de pétrole sont confrontés à deux crises énergétiques conjointes : la crise du pétrole et la crise du bois de feu. Bien que l'on envisage à Madagascar d'exploiter les grès bitumineux de Bemolanga et les gisements

- (**) Une partie de ce travail a fait l'objet de communications à l'Académie Malgache les 19 Novembre et 10 Décembre 1981, ainsi qu'à l'exposition "Biotechnologies" organisée par le CITE le 29 Juin 1982.
- (***) Département des Industries Agricoles et Alimentaires, Etablissement d'Enseignement Supérieur des Sciences Agronomiques, Université de Madagascar - B. P. 175 - Antananarivo.
- (****) Professeur à l'Université de Droit, d'Economie et des Sciences de Marseille, (Université d'Aix-Marseille III) - IUT de Marseille, rue des Géraniums, 13 337 Marseille Cedex 14 et Laboratoire de Phytchimie, rue Henri Poincaré, 13 397 Marseille Cedex 13 - FRANCE.

d'huile lourde de Tsimiroro, il faudra mettre en valeur de nouvelles ressources jusqu'à présent insuffisamment ou mal exploitées. La biomasse se trouve au premier rang de ces ressources et sa mise en valeur énergétique s'impose. La figure 1 donne un schéma d'ensemble de sa production et de son utilisation.

Les procédés de conversion utilisés pour transformer la biomasse en combustible peuvent être :

- soit *thermochimique* (ou voie sèche) : il s'agit de la combustion, de la pyrolyse, de la gazéification et du craquage catalytique. Seules, les deux premières filières sont utilisées à Madagascar : la combustion - ou incinération pure et simple (balle de riz, bagasse, coque d'arachide ...) - s'effectue dans des chaudières industrielles pour produire de la vapeur et parfois de l'électricité ; la pyrolyse - ou thermodécomposition en atmosphère pauvre en oxygène - est utilisée pour la production de charbon de bois à usage domestique à partir d'eucalyptus.
- soit *biochimique* (ou voie humide) : il s'agit de la fermentation alcoolique et de la fermentation méthanique.

Nous commencerons cet article par une étude sur les graines oléagineuses à usage industriel existant à Madagascar (ricin, aleurites, purghère) et les possibilités d'utilisation de ces huiles végétales comme source de carburant par combustion directe dans des moteurs Diesel ou comme source de matières premières pour l'industrie chimique par craquage catalytique. Nous passerons ensuite en revue les deux filières de traitement biochimique :

- la fermentation alcoolique à partir de plantes riches en hydrates de carbone cultivées à Madagascar (canne à sucre, manioc, maïs) en vue de

la production d'un combustible liquide ;

- la fermentation méthanique qui peut être mise en oeuvre sur les résidus lignocellulosiques des cultures céréalières (riz, maïs...) et sur les eaux résiduaires et les déchets concentrés des industries agricoles et alimentaires nombreuses dans notre pays. Elle conduit à un double résultat : production d'un combustible gazeux d'une part, production d'un fertilisant organique, d'autre part.

1. VALORISATION ENERGETIQUE DES HUILES VEGETALES

Si l'utilisation des huiles végétales comme source énergétique fait l'objet de nombreuses controverses par suite du problème de la faim dans le monde, il faut noter que Madagascar dispose d'un certain nombre de plantations de graines oléagineuses à usage industriel et non encore valorisées sur place.

11. Plantations existantes

a) Le ricin

Le ricin (*Ricinus communis*, Euphorbiacées sous espèce minor) dont le nom malgache est fonction de la variété (tanantanamanga, tanantanakisoa, kinana ... etc) est très répandu sur le bord des chemins et les abords des villages. On le rencontre surtout dans le Sud (Tsihombe, Faux Cap, Ambovombe) près de Fort-Dauphin. Les surfaces cultivées (7 000 ha entre 1964-68) et la production (3 300 t en 1940) n'ont cessé de décroître au cours de la dernière décennie. Cette graine contient un alcaloïde toxique, la ricinine. Les tourteaux sont utilisés comme engrais car ils ne peuvent servir pour l'alimentation animale. La composition de l'huile de ricin se caractérise par sa forte teneur en acide ricinoléique (acide hydroxy-12 octadécène-9 oïque) qui varie entre 85 et 90 %, comme le montre le

tableau I*. Les applications industrielles de l'huile de ricin sont nombreuses : fabrication de peintures et vernis, d'huiles lubrifiantes, de savons, de shampooings, préparation de produits pharmaceutiques (baumes, purgatifs). Le craquage de l'acide ricinoléique permet d'obtenir l'acide amino-undécylénique qui sert de matière première à la fabrication du nylon 11, dont on avait envisagé l'installation d'une unité à Madagascar.

L'huile de ricin peut être utilisée directement comme combustible et à titre expérimental, une ligne d'autobus de la ville de Brasilia (Brésil) fonctionne actuellement avec cette huile (1).

b) Les aleurites

Le genre Aleurites appartient à la famille des Euphorbiacées. Il groupe cinq espèces voisines (2, 3) :

- *A. trisperma* qui donne l'huile de Lumbang,
- *A. cordata* qui donne l'huile de bois de Japon,
- *A. moluccana* ou *A. triloba* qui est très répandue dans toutes les régions tropicales où il est connu sous le nom de bancoulier. L'huile extraite ne contient pas d'éléostéarine (huile de bancoul),
- *A. fordii* qui donne l'huile de bois de Chine ou huile de Tung,
- *A. montana* qui donne l'huile d'Abrasin.

A Madagascar, on rencontre essentiellement *A. moluccana* (n. malg. Bakoly, Savoga) sur la côte Est et *A. fordii*. Nous avons pu récolter aussi des fruits de *A. montana* dans la station agricole de Nanisana (Antananarivo). La culture de *A. fordii* a été tentée à partir de 1940 sur les Hauts-Plateaux à une altitude comprise entre 1 200 et 1 500 m en alternance avec l'arachide.

(*) Cf. tableaux et figures en fin d'article.

Les Tungs couvrent à l'heure actuelle environ 4 000 ha dont les trois quart se trouvent dans l'Itasy ; un deuxième centre se trouve dans la région d'Antsirabe et le troisième centre se trouve dans la région de Fianarantsoa.

La propriété caractéristique de l'huile de bois de Chine est sa richesse en acide α -éléostéarique [acide octadécatriène-9, 11, 13-, oïque - (Z, E, E)], comme le montre le tableau I. Il s'ensuit que cette huile est très siccativ. Elle est rarement utilisée sous sa forme naturelle car elle provoque le phénomène de "givrage" (vernis, peintures). Elle est souvent utilisée après polymérisation thermique en présence d'huile de lin (4).

Les tourteaux d'A. fordii sont riches en matières azotées (30 p.100) mais ils ne peuvent être utilisés pour l'alimentation du bétail car ils contiennent une substance toxique. Il est possible de les utiliser comme engrais ou de les brûler pour produire du noir de fumée (encre de Chine). L'huile d'A. moluccana n'a pas les mêmes utilisations car elle ne contient pas d'acide α -éléostéarique (Tabl. I).

c) Les purghères

Parmi les différentes espèces de purghère que l'on peut rencontrer dans les zones tropicales (5), il en existe deux à Madagascar, dont l'une est endémique. Très bien acclimaté, le purghère ou pignon d'Inde (Jatropha curcas, famille des Euphorbiacées) se rencontre souvent dans les formations secondaires des régions chaudes et l'abondance des noms vernaculaires (kisana, kizaka, kinafotsy, etc.) atteste de la fréquence et de l'intérêt de ce végétal introduit volontairement au 18ème siècle. Le fruit est une capsule sphérique à trois loges renfermant chacune une grosse graine noire. Le purghère n'a fait l'objet d'une culture qu'en Guinée et au Cap Vert (5). A Madagascar, cet arbre est utilisé comme tuteur des vanilliers (50 p.100 de la surface actuelle, soit 10 000 ha) et, dès 1932, des essais d'extraction industrielle ont été réalisés.

Les propriétés purgatives de la graine et de l'huile de purghère sont dues à la présence d'un constituant, la curcine ou curcasine, et certaines variétés peuvent provoquer la mort par absorption de 3 ou 4 graines. L'utilisation de cette huile pour l'industrie des peintures et vernis ne présente pas d'intérêt car elle est peu siccativ. En effet, la composition en acides gras (Tabl. I) indique que cette huile est constituée pour plus de 75 p.100 d'acides oléique et linoléique. Mise à part l'utilisation de cette huile en savonnerie (11) et stéarinerie, des essais ont été réalisés pour l'utiliser directement ou en mélange avec du gasoil, pour faire fonctionner les moteurs diesel (5, 15). Les résultats obtenus lors de la pyrolyse de graines de purghère par FRANCOIS (6) sont indiqués dans le tableau II.

Compte tenu de l'aptitude du pignon d'Inde à croître sur des sols où ne se développent pas les autres plantes oléagineuses, de son rendement assez élevé (8t/ha de graines (5) dont la teneur en huile peut aller de 37 p.100 (5) à 58 p.100 (12)) et de ses propriétés intéressantes en tant que source de carburant pour moteurs diesel, des essais de cultures dans la région du Sud-Ouest malgache pourraient être entrepris. La sélection de cette plante est assez facile en raison de sa reproduction rapide par bouturage.

Une deuxième espèce de purghère, qui est endémique, fait l'objet d'une cueillette. Il s'agit de *Jatropha mahafalensis* (n. malgache : Atratra ou Be-tratra) dont les graines de couleur blanche sont utilisées comme purgatif drastique (13). On la rencontre essentiellement dans le Sud-Ouest de Madagascar (plateau de Mahafaly). *J. mahafalensis* pousse et se reproduit comme *J. curcas*, et son rendement lui est comparable. L'huile extraite des graines a des propriétés voisines et sa composition en acides gras est assez proche (Tabl. I).

12. *Autres plantes riches en matières oléagineuses*

Le climat de Madagascar est assez varié : chaud et humide sur la côte Est, aride dans le Sud-Ouest. Des essais de cultures de plantes à forte teneur en matières grasses pourraient être entrepris pour développer des régions actuellement moins favorisées par l'effort de développement du pays.

Plus de 37 millions d'ha (62 p.100 de la superficie totale du pays) sont actuellement utilisés uniquement comme pâturage et pourraient être utilisés pour développer de nouvelles cultures. Certaines plantes donnant des graines oléagineuses peuvent croître sur des terres arides, c'est le cas notamment de certaines cucurbitacées. Des essais ont été entrepris aux Etats-Unis avec *Cucurbita foetidissima* (22) qui peut produire deux fois plus d'huile que le tournesol et les racines peuvent aussi servir à la production d'alcool. D'autres plantes pourraient être essayées sur la côte Est où le climat est plus humide : c'est le cas de *Sapium sebiferum* (l'arbre à suif de Chine) dont la production en huile par hectare est 12 fois supérieure à celle du tournesol (14).

13. *L'utilisation des huiles végétales comme source de carburant*

Au début du siècle, DIESEL signalait la possibilité d'utiliser les huiles végétales pour faire fonctionner ses moteurs. De nombreux essais ont été réalisés avant et après la deuxième guerre mondiale, notamment sur l'huile de purghère (15), sans traitement préalable. L'utilisation directe de ces huiles peut présenter des inconvénients pour les moteurs diesel à vitesse de rotation rapide (voiture) à cause du retard à l'inflammation, ce qui entraîne une baisse du rendement et un encrassement rapide des moteurs. Il est indispensable de raffiner l'huile afin de la débarasser des particules solides susceptibles d'obstruer les injecteurs et de la démulaginer pour diminuer le taux d'encrassement. Depuis quelques temps un certain nombre de

3

pays industrialisés (Etats-Unis, Union Sud-Africaine, Brésil, etc.) développent des programmes d'études sur les huiles végétales pouvant supplanter le gasoil dans les moteurs diesel (1, 16).

Afin d'abaisser le point de fusion des triglycérides utilisés comme carburant, il est possible de réaliser une réaction de transésterification avec du méthanol ou de l'éthanol. Cette opération peut être obtenue par simple chauffage vers 40°C en utilisant de l'acide chlorhydrique comme catalyseur ou simplement à partir des cendres résultant de la combustion des rafles, coques, etc. Pour déplacer l'équilibre vers la formation des esters méthyliques ou éthyliques, il faut utiliser un large excès de monoalcool. Les esters méthyliques se séparent facilement du milieu réactionnel, sans qu'il soit nécessaire de distiller le méthanol. Pour un pays comme Madagascar, producteur d'éthanol, le coût de l'opération de distillation pourrait être diminué par la récupération du glycérol.

Nous avons regroupé dans le tableau III les estimations des productions de combustibles susceptibles d'être obtenues à Madagascar et leur équivalent énergétique d'après les rendements moyens. On peut remarquer que la plante la plus efficace du point de vue énergétique est le palmier à huile (*Elaeis guinensis*). Le tableau IV nous montre la quantité d'huile qu'il serait possible d'obtenir à partir des plantations existantes de graines oléagineuses à usage non alimentaire. La consommation annuelle de gasoil à Madagascar étant d'environ 1,6 million d'hl, il serait possible très rapidement d'en produire le quart, et une extension de 60 000 ha (soit 2,5 p.100 des surfaces totales cultivées) permettrait d'aboutir à l'auto-suffisance. Le développement de telles cultures dans le Sud-Ouest malgache permettrait une remise en place d'un équilibre entre les populations rurales des différentes provinces d'une part, et rurales et urbaines d'autre part.

14. *Le craquage catalytique des huiles végétales en tant que source de carburants et matières premières pour l'industrie chimique*

Si l'on essaie à l'heure actuelle de transformer la cellulose en hydrocarbure (7), on sait depuis longtemps que les huiles végétales, peuvent être pyrolysées pour donner ce genre de composés. Récemment, WEISZ et AL. (8, 9) de la Mobil Research and Development Corp., ont montré qu'il est possible de transformer le méthanol, les huiles végétales et le latex en hydrocarbures comme le montre le tableau V. Par ailleurs, GRAILLE et AL. (10) ont obtenu des résultats prometteurs en effectuant le craquage catalytique des sous-produits de l'huilerie de palme sur des silicoaluminates cristallisés ou amorphes.

Ces hydrocarbures, dont la longueur de chaîne peut aller de 1 à 15 atomes de carbone, peuvent être utilisés comme carburant pour les moteurs à explosion (bon indice d'octane : aromatiques, etc.), pour les moteurs diesel (bon indice de cétane : aliphatiques, etc.), et comme matières premières pour l'industrie chimique (solvants, etc.). Les catalyseurs utilisés par WEISZ et AL. sont des silicoaluminates (zéolithe de type ZSM-5). Madagascar possède un certain nombre de gisements de zéolithes naturels qui pourraient être utilisés pour le craquage catalytique de l'alcool éthylique et des huiles végétales.

Le procédé de production de carburants et de produits chimiques à partir de ces deux sources de matières premières est représenté par la figure 2. L'alcool éthylique obtenu par fermentation des hydrates de carbone pourrait être utilisé comme additif au carburant pour moteurs à essence et pour la production de carburant pour moteurs diesel par transestérification des triglycérides des huiles végétales. L'excès d'alcool éthylique et des huiles végétales pourrait être traité par craquage catalytique pour produire des hydrocarbures.

2. L'ALCOOL COMME SOURCE DE CARBURANT

La voie la plus commune pour fabriquer de l'alcool consiste à partir de plantes riches en hydrates de carbone. Cette opération de production de l'éthanol, par fermentation d'un jus sucré, est suivie d'une distillation afin de l'obtenir à une concentration élevée pour qu'il soit utilisable comme carburant. Les sucres fermentescibles proviennent directement des plantes et les matières premières utilisées peuvent être :

- soit des plantes saccharifères comme la canne à sucre,
- soit des tubercules comme le manioc,
- soit des céréales comme le maïs.

Dans les deux derniers cas, il s'agit de matières premières qui contiennent de l'amidon qui, par une hydrolyse enzymatique, sera décomposé en sucres fermentescibles. Quant à la canne, elle contient déjà des sucres directement fermentescibles : il suffira d'en extraire le jus, ou d'utiliser le sous-produit de son traitement industriel qu'est la mélasse.

Le tableau VI donne une estimation des productions annuelles d'alcool par hectare qui pourraient être obtenues à partir de la canne à sucre, du manioc et du maïs, plantes cultivées en abondance à Madagascar.

La canne à sucre est la plante ayant le potentiel le plus intéressant car elle a le rendement énergétique par hectare le plus élevé. Il faut, de plus, noter que l'énergie nécessaire au fonctionnement des colonnes à distiller est obtenue, dans ce cas, à partir du résidu du traitement de la canne qu'est la bagasse, ce qui rend ce procédé de production d'alcool remarquablement économique.

On estime à 25 p.100 environ la proportion de canne produite en milieu rural, principalement sur la côte Est où les conditions climatiques s'y prêtent parfaitement : 200 à 250 000 tonnes de canne à sucre pourraient être facilement retenues pour la production d'alcool carburant. Toutefois, celle-ci se fera dans l'immédiat à partir de la transformation des mélasses obtenues en quantités importantes (40 à 42 000 t/an) dans les quatre exploitations industrielles sucrières existant à Madagascar (Nosy-Be, Namakia, Brickaville et Ambilobe). Trois de ces unités possèdent déjà des distilleries qui produisent de l'alcool de bouche principalement, la dernière vient d'acquérir une installation qui sera opérationnelle en 1983 et qui, à partir de 24 000 t/an de mélasse, produira 68 000 hl d'alcool anhydre.

Second après la canne à sucre pour la production d'alcool par hectare, le manioc est le tubercule ayant la teneur la plus élevée en amidon (25 p.100). Bien connu à Madagascar (production annuelle moyenne 1,5 million de tonnes), il pourrait être une alternative à la canne à sucre pour les régions du Sud qui sont les plus sèches. Le manioc pousse sur un sol relativement pauvre, demande moins d'eau et moins d'engrais que la canne et a une bonne résistance aux prédateurs. Il faut cependant, lors du traitement industriel du manioc, prévoir l'opération supplémentaire d'hydrolyse de l'amidon en sucres fermentescibles. La comparaison des conditions de production du manioc et de la canne à sucre et des conditions de leur transformation en alcool semble être nettement à l'avantage de cette dernière dans le cas de Madagascar (17). De plus, il n'existe à notre connaissance que quelques unités de production d'alcool à partir du manioc qui sont entrées récemment en fonctionnement, notamment au Brésil (1) et l'utilisation du manioc fait encore l'objet de diverses recherches.

En dernière position, se situe le maïs qui, en tonnage (120 000 t/an environ), est la deuxième céréale produite à Madagascar. Il ne semble cependant pas très prometteur à cause de son faible rendement en alcool par hectare (sept fois moins qu'avec la canne).

On notera enfin que toute étude sur la production d'alcool à partir des plantes, en vue de son utilisation comme source de carburant, doit tenir compte du bilan énergétique : pour un litre d'alcool produit, il faut chiffrer l'énergie dépensée (production agricole, transport, fermentation, distillation) vis-à-vis de l'énergie récupérable (8,2 kWh/kg). La canne à sucre semble là aussi la plus économiquement transformable en carburant automobile à Madagascar. Les quantités annuelles d'alcool qui pourraient être obtenues à partir de sa production actuelle figurent au tableau VII. La consommation d'essence étant d'environ 1,3 million d'hl/an, si l'on utilise l'alcool anhydre produit en mélange à 10 p.100 avec l'essence (ce type nouveau de carburant ne nécessite qu'un réglage du moteur), il resterait 180 000 hl qui pourraient être utilisés comme matière première de base pour la transestérification des huiles végétales, pour le craquage catalytique et pour une industrie chimique adaptée au marché local.

3. LA FERMENTATION METHANIQUE

3.1. Principe

C'est un processus de digestion anaérobie caractérisé par l'existence de deux phases bien distinctes (figure 3) :

- une première phase, dite acidogénèse, qui conduit à la formation d'acides gras volatils, d'ammoniac, de gaz carbonique et d'hydrogène,
- une deuxième phase dite méthanogénèse, où le méthane et un surplus de gaz carbonique sont produits à partir des acides.

Le méthane provient des deux types de réaction : la synthèse à partir de $H_2 + CO_2$ (30 %) et la décomposition des acides gras volatils (70 %). Ce sont des populations bactériennes différentes qui sont responsables de chacune de ces deux phases et nous donnons dans le tableau VIII les principales souches d'acidogènes et de méthanogènes. Pour que leur action soit efficace, les bactéries présentes dans les digesteurs ont besoin des conditions physico-chimiques très strictes, en particulier en ce qui concerne la granulométrie du substrat, la température et le pH. Les deux populations (acidogène et méthanogène) ont des vitesses de croissance très différentes : les bactéries productrices d'acides se développent beaucoup plus rapidement que celles productrices de méthane. De même leurs exigences pour une croissance optimale sont différentes.

Les récents travaux sur la microbiologie et la biochimie de la digestion anaérobie apportent des connaissances décisives sur les mécanismes mais ils soulignent aussi leur complexité (23).

Les quantités théoriques de biogaz produites à partir de divers matériaux sont indiquées dans le tableau IX. On peut aussi a priori calculer le pouvoir méthanogène d'un matériau par rapport à la demande chimique en oxygène (DCO) : un kilo de DCO correspond à 350 l de méthane (pris sous la pression atmosphérique et à 20°C). L'étude expérimentale des fermentations peut toutefois seule permettre de comparer quantitativement la productivité effective en méthane de différents matériaux et de l'optimiser.

32. Procédés utilisés

Plusieurs choix de réacteurs (ou digesteurs) sont possibles pour réaliser la fermentation méthanique (20) :

. le réacteur unique, où se produisent simultanément les réactions d'acidification et de

production de méthane. L'alimentation est intermittente, le contenu du digesteur est le plus souvent chauffé (à 35°C) et une agitation mécanique homogénéise le milieu ;

. le réacteur multiétage, où l'on fractionne les séquences réactionnelles dans différents compartiments successifs (procédé à 2 étapes) ; les deux phases biochimiques ont lieu dans deux digesteurs en série alimentés en continu, la séparation des phases apparaissant comme un moyen de contrôle.

On utilise le plus souvent un processus de contact anaérobie qui permet de recycler les microorganismes et d'augmenter l'activité biologique (figure 4).

La faisabilité technologique de la fermentation méthanique n'est toutefois pas encore complètement acquise. Pour développer la fiabilité et la maîtrise du procédé, des expérimentations doivent être conduites en vue d'optimiser le rendement en méthane en fonction des paramètres de fonctionnement qui sont :

- . la charge des matières introduites ;
- . le temps de séjour des matières à l'intérieur du réacteur ;
- . la concentration de matières.

33. Utilisation énergétique du biogaz

En milieu rural le biogaz obtenu à partir des déchets et des déjections de la ferme pourrait être utilisé à des fins domestiques (cuisine, éclairage) ou dans un moteur à explosion couplé à un générateur électrique et à un réseau d'échangeurs pour la récupération de la chaleur dans les gaz d'échappement : on obtiendrait ainsi une production combinée d'électricité et de chaleur. La firme italienne FIAT commercialise actuellement sous le nom de TOTEM (Total Energy Module) une telle unité spécialement adaptée à

la filière biométhane. La puissance électrique obtenue est de 14 kw environ, la puissance thermique de 36 kw (24).

En milieu industriel, la fermentation méthanique conduirait à la réalisation de centrales de purification du biogaz - passage sur eau de chaux ou carbonates pour éliminer le CO_2 - et de production de méthane qui permettraient de réduire les besoins en énergie d'origine pétrolière de nombreuses industries. En effet, moyennant un brûleur et un dispositif d'alimentation adéquat, les chaudières peuvent utiliser le méthane comme combustible (**). Elles servent à produire la vapeur utilisée dans les équipements industriels comme fluide chauffant ou dans une turbine en vue de la production d'énergie électrique. L'excédent de méthane produit par ces centrales pourrait servir à produire du méthanol et des hydrocarbures ou remplacer le gaz butane en bouteille utilisé en milieu urbain. On pourrait ainsi éviter le déboisement destiné à obtenir du bois de feu pour la cuisine. On notera toutefois que si le méthane peut être comprimé et mis en bouteilles sous 150 à 200 bars, cette opération intéressante pour le stockage est très onéreuse, aussi bien en investissement qu'en fonctionnement.

34. Le traitement des eaux résiduaires des Industries Agricoles et Alimentaires

L'épuration biologique des eaux résiduaires par voie anaérobie est appliquée dans plusieurs procédés :

. les lagunes, qui occupent un espace important à cause de la lenteur des processus biologiques à température ambiante,

(**) Pouvoir calorifique du méthane : 9,3 kwh/m³.

. les fosses septiques à usage domestique,

. la digestion anaérobie qui peut se faire à température plus élevée (35° à 50°C) et qui permet de récupérer le méthane. Elle permet en outre de traiter des effluents très concentrés en matières organiques, comme dans le cas des eaux résiduaires de certaines industries agricoles et alimentaires (confert Tableau X).

Dans ce secteur, la fermentation méthanique est intéressante par suite du couplage épuration-production d'énergie. Pour des rejets à forte charge polluante, la compétitivité du procédé de digestion anaérobie apparaît nettement vis-à-vis des autres systèmes d'épuration, consommateurs d'énergie, dont le coût grandissant compromet leur utilisation.

On trouve dans la littérature des travaux concernant la fermentation des effluents de conserverie de fruits et de légumes (25, 26) de brasserie (27) et de sucrerie (28).

Dans le tableau XI figurent quelques résultats obtenus à l'échelle industrielle lors du traitement anaérobie des eaux résiduaires de quelques IAA.

On remarquera que pour obtenir des rendements d'épuration du même ordre, on a dû appliquer des temps de séjour, très différents à des eaux ayant des demandes biochimiques en oxygène (DBO) voisines. La variabilité des résultats empêche de conclure de façon définitive sur la traitabilité des différents types de rejets et sur les performances de la fermentation méthanique appliquée à ces rejets. De nombreux autres travaux seront nécessaires pour préciser le traitement le mieux adapté à un type donné d'effluent.

Le secteur qui offrirait à Madagascar les perspectives les plus intéressantes, semble être celui de l'épuration des vinasses de distillerie de mélasse qui

ont une DBO élevée, supérieure à 15 000 mg/l et sont rejetées à la mer. La décomposition de la matière organique entraînant une consommation d'oxygène plus ou moins importante, celui-ci est nécessairement pris sur l'oxygène dissous dans l'eau au détriment des besoins de la flore et de la faune.

Les sucreries-distilleries de canne occuperont dans un proche avenir une place particulière pour le développement de la fermentation méthanique.

En effet, d'une part, l'excédent de bagasse provenant des moulins et non utilisé à des fins énergétiques dans les chaudières est actuellement jeté à la rivière (environ 15 kg par tonne de canne) et pourrait être soumis à la fermentation méthanique. De plus, on estime à 5 - 6 kg par tonne de canne la quantité de produits biodégradables contenus dans les eaux résiduaires de sucrerie. Enfin les vinasses issues de la distillation de la mélasse sont des liquides renfermant une partie des sels minéraux de la canne et une quantité importante de matières organiques solubles (confert Tableau XII).

Pour un hectolitre d'alcool pur produit par distillation de vins de mélasse à 6 - 7° GL, on obtient 10 hectolitres de vinasse. Ce résidu de distillation entraîne une charge polluante équivalente à

Demande chimique en Oxygène (50 000 mg/l) = 50 kg DCO

Demande biologique en Oxygène (30 000 mg/l) = 30 kg DBO

Matières en suspension (5 g/l) = 5 kg

Le pH varie de 3.0 à 4.5 abaissant ainsi fortement le pH du milieu récepteur et la température de rejet directe, voisine de 98°C, augmente considérablement la température de ce milieu. Les problèmes de pollution découlant du rejet des vinasses n'échappent pas

aux utilisateurs ; il est nécessaire de traiter celles-ci avant d'en effectuer le rejet dans un milieu naturel.

De récents travaux ont porté sur l'étude de la fermentation méthanique de vinasse de vin en deux phases séparées (31). Les performances obtenues en épuration sont élevées (98 %). Les pourcentages de conversion du carbone de la vinasse en méthane sont de 45 à 50 %.

Pour une vinasse dont la DCO est de 30 000 mg/l la production de méthane se chiffre à 1 m³/hl de vinasse soit l'équivalent énergétique de 9,3 Kwh.

La figure 5 montre le bilan énergétique de la distillation d'alcool de vin de mélasse et du traitement des vinasses par fermentation méthanique. Celle-ci produit l'équivalent de 9,3 Kwh par hectolitre de vinasse soit près de 30 % de la consommation de la distillation. Le rendement énergétique de la distillation d'alcool :

$$\frac{\text{Valeur énergétique de l'alcool} - \text{énergie de distillation}}{\text{Valeur énergétique de l'alcool}} = 0,4$$

prendrait une valeur de 0,6 par récupération de l'énergie produite par fermentation des vinasses.

Ce bilan très favorable de la fermentation méthanique en fait un système producteur d'énergie pouvant améliorer de façon non négligeable le bilan de la production d'alcool. Dans le cas où la distillerie fonctionnerait avec la bagasse excédentaire de la sucrerie, utilisée comme combustible dans les chaudières, la fermentation des vinasses donnerait une masse d'énergie récupérable. Ainsi, la future distillerie d'Ambilobe, qui produira 68 000 hl d'alcool pur (AP) par an, devrait permettre de récupérer .

$6.8.10^5 \text{m}^3$ de méthane soit un équivalent énergétique de 570 TEP (**) par an.

En admettant que les besoins domestiques journaliers pour la cuisson des repas soient de $0,2 \text{ m}^3$ de méthane par personne, cette quantité pourrait couvrir les besoins annuels d'une ville de 10 000 habitants. Pour un pays comme le Brésil qui envisage de produire 7.10^8H d'alcool pur pour l'an 2000 (1) la quantité de méthane récupérable des vinasses serait de 7.10^9m^3 soit un équivalent de 6.10^6 TEP par an.

Nous avons regroupé dans le tableau XIII les estimations des quantités de méthane récupérables à partir des déchets d'une sucrerie-distillerie et ramené à la tonne de canne les quantités d'énergie obtenues. Il souligne l'intérêt qu'aurait une sucrerie-distillerie à compléter son équipement par des fermenteurs produisant du méthane et des engrais organiques aux dépens de la vinasse et de l'excédent de bagasse non utilisée. Dans le cas précis des vinasses de distillerie de mélasse, la fermentation méthanique apporte donc une valorisation énergétique des déchets intéressante et représente une solution séduisante au problème du traitement des rejets liés à la production d'éthanol, secteur en cours de développement à Madagascar.

Des installations de fermentation méthanique, mises au point par l'Institut de Recherche de l'Industrie Sucrière (IRIS) fonctionnent actuellement en France dans des sucreries-distilleries (34) et permettent de récupérer 700 m^3 de méthane/jour.

(**) $1 \text{ TEP} = 11,2.10^3 \text{ Kwh}$.

35. La bioconversion méthanogène des matières végétales

La première étape de valorisation énergétique de la biomasse végétale passe par l'utilisation des déchets et sous produits agricoles et forestiers. La conversion en biogaz peut s'effectuer à partir des résidus lignocellulosiques des cultures céréalières (riz, maïs, ...) et oléagineuses (arachide, ...). Une partie des pailles diverses est utilisée en élevage, une autre partie est brûlée ou enfouie dans les champs. On pourrait, sans risque pour la fertilité des sols, récupérer le tiers de cette dernière fraction pour la production d'énergie. On trouvera dans le tableau XIV les rendements de biogaz et de méthane fournis par diverses matières végétales (32).

La mise en oeuvre de cultures dans un but spécifiquement énergétique constitue la deuxième étape. Il s'agit de végétaux dont la productivité est élevée et l'usage en général non alimentaire. Nous citerons la jacinthe d'eau (*Eichornia crassipes*) qui se développe particulièrement bien en milieu tropical sur les fleuves et les rivières en formant un tapis épais et solide (24).

Les essais de fermentation de cette plante ont donné à petite échelle des résultats très encourageants. Des expérimentations en grandeur nature sont en cours au Congo (33). La jacinthe d'eau contient en moyenne 19 % de protéines, 17 % de fibres et 50 % d'eau. Elle peut produire plus de 100 tonnes de matières sèches par hectare. En retenant une production de 0,450 m³ de biogaz par kg de matière sèche (chiffre confirmé par de nombreux auteurs pour les matières végétales) on obtiendrait, par hectare, 45 000 m³ de biogaz (dont 31 500 m³ de méthane) ce qui donnerait une masse d'énergie récupérable de 280 000 kWh/ha (25 TEP/ha). Il s'agit, à l'hectare,

d'une quantité d'énergie dix fois plus grande que celles obtenues à partir de cultures de plantes oléagineuses (confert tableau III) réalisées dans le but de produire un combustible liquide. La jacinthe d'eau a un potentiel énergétique particulièrement élevé.

En concentrant sa production naturelle, on pourrait implanter des usines de traitement et de conversion de grande capacité qui atteindraient facilement le seuil de rentabilité technicoéconomique.

On notera aussi que les algues cultivables en pleine mer ou dans des structures artificielles donnent le rendement en CH_4 le plus élevé.

C O N C L U S I O N

Plusieurs filières sont actuellement disponibles pour transformer la biomasse en combustible.

Nous préconisons pour Madagascar le développement simultané de la production d'alcool éthylique et des huiles végétales à usage industriel. En effet, les zones de production de la canne à sucre sont relativement étendues à cause d'une pluviométrie favorable sur la majeure partie de l'île. Pour ce qui est de la production d'huiles végétales, il serait possible dans un premier temps de relancer certaines plantations existantes (ricin, aleurites, purghères) et de commencer des plantations situées dans les zones arides du Sud Ouest.

Nous avons insisté sur la fermentation méthanique pour deux raisons :

- tout en fournissant de l'énergie, elle conduit à un fertilisant organique (humus et azote organique) et l'on sait qu'un des facteurs de développement rural passe par la fourniture d'énergie et d'engrais organiques,

- elle utilise un matériel simple, peu coûteux qui répond au niveau technologique et économique de Madagascar à l'heure actuelle.

Nous avons souligné l'intérêt que présente la fermentation méthanique pour, à la fois, l'épuration et la valorisation énergétique des rejets des Industries Agricoles et Alimentaires.

On trouvera dans le tableau XV quelques données sur le tonnage des principaux résidus solides produits par le secteur agro-industriel à Madagascar. Ceux-ci se caractérisent par un important volume d'origine essentiellement organique. La bioconversion méthanogène appliquée à un bon nombre de ces déchets serait susceptible de constituer une source d'énergie intéressante. En ajoutant les déchets animaux récoltables, on pourra ainsi procéder à une évaluation globale du potentiel annuel énergétique récupérable à l'état de biogaz. Il restera ensuite à intégrer ces données techniques aux contraintes socio-économiques de Madagascar et à envisager ses possibilités d'insertion dans les systèmes actuels de production industrielle, animale et végétale.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à MM. J. P. BIANCHINI, Professeur à l'EESSA, A. RAMANOELINA et J. RASOARAHONA, pour les analyses chromatographiques des différentes huiles végétales.

Tableau I - Teneur en huile et composition en acides gras des huiles de Ricinus, d'Alouettes et de Jatropha de Madagascar a)

| Especie | R. communis | A. montana | A. fordii | A. malucana | J. curcas | J. mahafo- lensis |
|----------------------------------------------|-------------|------------|-----------|-------------|-----------|----------------------|
| Teneur en Huile (b) par rapport à l'amide | 45,3 | 65,9 | 56,4 | 60,1 | 55,4 | 53,8 |
| Composition en acides gras (b) | | | | | | |
| C ₁₆ : 0 | 0,9 | 0,4 | 3,0 | 6,2 | 15,3 | 11,1 |
| C ₁₆ : 1 | | | | | 0,9 | 0,2 |
| C ₁₈ : 0 | 0,5 | 2,9 | 2,7 | 4,9 | 7,5 | 8,4 |
| C ₁₈ : 1 | 2,7 | 14,4 | 8,0 | 28,2 | 41,1 | 34,7 |
| C ₁₈ : 2 | 3,1 | 14,9 | 10,9 | 35,2 | 34,9 | 44,8 |
| C ₁₈ : 3 | 0,2 | 0,3 | | 27,4 | 0,2 | 0,3 |
| C ₂₀ : 0 | | | | | | 0,5 |
| Ricinoléique | 92,6 | | | | traces | |
| -oléostéarique | | 67,1 | 85,7 | | | |

(a) Analyses par UPG après transformation des huiles en esters méthyliques par méthanalyse alcaline. Appareil GIBBEL 30 à ionisation de flamme équipé d'un injecteur diviseur et d'une colonne capillaire en verre Carbowax 20 R, 30 m de longueur, d.i. 0,3 mm ; épaisseur de phase 0,3 µm ; température : four 180°, détecteur et injecteur 220° ; pression d'aide 0,5 bars, débit de fuite 60 ml/min.

(b) Pourcentage en poids.

Tableau II - Quantité de produits obtenus par la pyrolyse de 1 tonne de purghère
(*Jatropha Curcas*) (6)

| Quantité pour 1 t (kg) | Type de produits |
|---------------------------|---------------------------------------------|
| 70 | carburant raffiné (type essence et pétrole) |
| 40 | gasoil léger |
| 40 | gasoil ordinaire |
| 35 | brai sec |
| 270 | semi-coque |
| 200 | eau ammoniacale, gaz, créosote, etc. |

Tableau III - Estimation des productions de combustibles et de leur equivalent energetique de quelques cultures oléagineuses a Madagascar d'après leurs rendements moyens.

| Type de culture | Combustible | Taux de transformation (l/t) (a) | Production (t/ha) (c) | Energie (kWh/ha) (b) |
|----------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Palmier a huile (Elaeis guineensis) | Huile vegetale (triglycerides) | 200 | 3 600-4 000 | 3' 00-37 700 |
| Ricin (Ricinus communis) | Huile vegetale (triglycerides) | 400 | 3- 5 (d) 1 200-2 000 | 11 300-18 900 |
| Aleurites (Aleurites fordii) | Huile vegetale (triglycerides) | 450 | 4- 6 (e) 1 800-2 700 | 17 000-25 500 |
| Purghere (Jatropha curcas) | Huile vegetale (triglycerides) | 350 | 6- 8 (f) 2 100-2 800 | 19 800-26 400 |

(a) Rendement industriel.

(b) Estimations sur la base huile de palme $d = 0,92$; Chaleur de combustion 10,246 kWh/kg.

(c) A partir de 10 ans sur la côte Est.

(d) D'après le rapport d'activités de l'Opération Ricin (1966). Les rendements sont beaucoup plus faibles en milieu rural.

(e) 0,6 t a 3 ans ; 4,5 t à 7 ans ; 6 t à 10 ans dans l'Itasy.

(f) Estimations sans base expérimentale d'après des données de Larochas (5).

Tableau IV - Estimation de la quantité annuelle d'huile qu'il serait possible d'obtenir à partir des plantations existantes de ricin, d'aleurites et de purghère à Madagascar.

| Plantes | Surface cultivée (ha) | Rendement (a) (hl/ha) | Production (hl) |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| Ricin | 7 000 | 16 | 112 000 |
| Aleurites | 4 000 | 22,5 | 90 000 |
| Purghère | 10 000 | 24 | 240 000 |
| Total | 21 000 | - | 442 000 |

(a) Moyenne d'après le tableau III.

Tableau V - Transformation du méthanol et de l'huile de maïs en hydrocarbures (a) (8)

| Hydrocarbures (b) p. 100 | Matières premières | |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------|
| | Alcool CH ₃ OH | Huile (Maïs) |
| Paraffines | 45 | 30 |
| Oléfines | 9 | 7 |
| Aromatiques | 42 | 51 |
| Cycliques | 4 | 14 |

(a) Catalyseur : zéolithe de type ZSM - 5 ; température 500°C environ.

(b) Hydrocarbures ayant une condensation en carbone allant de 1 à 15.

Tableau VI - Valeurs estimatives des productions annuelles d'alcool à partir de la canne à sucre, du manioc et du maïs d'après leurs rendements moyens à Madagascar.

| Plante | Rendement moyen (t/ha) (a) | Taux de transformation en alcool (l/t) (b) | Rendement en alcool (l/ha) |
|-------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|
| Canne à sucre | | | |
| milieu rural | 35 | 70 (c) | 2 450 |
| milieu industriel | 68 | 8 (d) | 544 |
| Manioc | 6 | 170 | 1 020 |
| Maïs | 1 | 350 | 350 |

(a) Moyenne des rendements sur les années 1977, 1978 et 1979 (Annuaire de Statistique Agricole de Madagascar).

(b) Rendement industriel.

(c) Telle quelle.

(d) Sous forme de mélasse.

Tableau VII - Estimation de la quantité d'alcool-carburant qu'il serait possible d'obtenir à partir de la production annuelle de canne à sucre à Madagascar.

| Canne à sucre utilisée | Production annuelle (milliers de t) (a) | Taux de transformation en alcool (l/t de canne) | Production d'alcool (hl) |
|------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------|
| Telle quelle | 325 | 70 | 227 500 |
| Sous forme de mélasse | 1 042 | 8 | 83 360 |
| Total | 1 367 | | 310 860 |

(a) Moyenne de production sur les années 1977, 1978 et 1979 (Caisse de Stabilisation des Prix de la Canne et du Sucre).

Tableau VIII - Principales souches d'acidogènes et de méthanogènes (18, 19).

| ACIDOGENES | METHANOGENES |
|--------------|---------------------|
| Alcaligenes | Methanobacterium |
| Bacillus | Methanobrevibracter |
| Clostridia | Methanococcus |
| Pseudomonas | Methanogenium |
| Ruminococcus | Methanosarcina |
| | Methanospirillum |

Tableau IX - Quantités théoriques de biogaz et de méthane produits à partir de divers matériaux (20).

| Matière première | Volume Biogaz m ³ /Kg | Volume CH ₄ m ³ /Kg | % CH ₄ |
|------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------|
| Oses | 0,75 | 0,37 | 50 |
| Lipides | 1,44 | 1,04 | 72 |
| Protéines | 0,98 | 0,49 | 50 |

Tableau X - Caractéristiques générales des eaux résiduaires de quelques industries agroalimentaires (29).

| Industrie | DCO mg/l | DBO mg/l |
|------------------------|-----------------|-----------------|
| Distillerie | 60 000 à 65 000 | 30 000 à 40 000 |
| Laiterie, fromagerie | 1 500 à 3 000 | 1 000 à 2 000 |
| Conserverie de légumes | 1 500 à 4 500 | 900 à 2 000 |
| Industrie de la viande | 10 000 à 15 000 | 7 000 à 10 000 |

Tableau XI - Exemples de résultats obtenus sur la digestion anaérobie d'effluents d'IAA (30).

| Origine des eaux traitées | DBO (mg/l) | Température de digestion (°C) | Temps de séjour (jours) | Rendement d'épuration (%) |
|---------------------------|------------|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Abattoir | 2 100 | 33 | 1,25 | 96 |
| Conditionnement de viande | 1 600 | 35 | 0,50 | 95 |
| Brasserie | 3 280 | - | 2,23 | 96 |
| Levurerie | 5 080 | 30 | 1,20 | 85 |
| Laiterie | 3 300 | 31 | 6,00 | 99,5 |
| Amidonnerie de maïs | 6 300 | 25 | 4,00 | 88 |
| Distillerie | 25 000 | 33 | 6,20 | 96 |

Tableau XII - Charge polluante d'une vinasse de mélasse (a)

| | |
|-------------------------------|-----------------|
| DCO (mg/l) | 25 000 à 50 000 |
| DBO (mg/l) | 15 000 à 30 000 |
| Matières en suspension (mg/l) | 2 500 à 5 000 |
| pH | 3 à 4,5 |
| Température °C | 98 |
| Alcool °GL | 0,03 à 0,1 |

(a) Moyenne des analyses sur 3 échantillons en provenance de distilleries locales.

Tableau XIII - Estimation des quantités de méthane récupérables et de leur équivalent énergétique pour des déchets de sucrerie et de distillerie de canne (a).

| Matières | kg/t de canne | CH ₄ produit | | Energie en kwh/t de canne |
|---------------------|------------------|-------------------------|-----------------|------------------------------|
| | | 1/kg matières | 1/t de canne | |
| Excédent de bagasse | 15 | 98 (b) | 1 470 | 14 |
| Vinasse de mélasse | 83 (c) | 9,6 (d) | 800 | 7 |
| Total | - | - | 2 270 | 21 |

(a) non compris les eaux résiduaires (lavage des cannes, condenseurs ...) à cause des nombreuses différences en quantités d'une sucrerie à l'autre.

(b) voir tableau n° XIV.

(c) pour un rendement industriel de 81 l'alcool pur par tonne, on obtient 80 l de vinasse de densité moyenne 1,04.

(d) 1 m³ de méthane pour 100 l de vinasse;

Tableau XIV - Rendements en CH_4 par unité de masse à partir de différentes matières végétales - Comparaison avec le lisier bovin (32)

| Matières | Gaz produit (1/kg) | % CH_4 | CH_4 (1/kg de matières) |
|----------------|-----------------------|-----------------|-------------------------------------|
| Balle de riz | 182 | 67 | 122 |
| Bagasse | 152 | 65 | 98 |
| Jacinthe d'eau | 225 | 70 | 157,5 |
| Algues | 351 | 72 | 252 |
| Lisier bovin | 214 | 66 | 141 |

Tableau XV - Tonnage annuel (1960) et utilisation des résidus solides produits par les principales IAA à Madagascar.

| Industrie | Matière | Quantité en tonnes (1960) | Nature | Résidus solides | | |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | | | Quantité en tonnes | Utilisation actuelle | |
| | | | | | Suggestions | |
| RIZERIE - DECORTIQUEURIE | Paddy | 400 000 | (Son | 28 000 | Alimentation animale | Récupération préliminaire de l'huile à des fins alimentaires soit 2 000 t huile/an |
| | | | (Balle | 20 000 | Combustible | - |
| TRAITEMENT DU CAFE | Cafe Vert | 80 000 | Pulpes Coques, Parches | 160 000 | - | Fermentation méthanique soit une production de 3.10 ⁶ m ³ méthane/an |
| TRAITEMENT DU CACAO | Cacao sec | 1 800 | Cabosses | 16 000 | - | Fermentation méthanique |
| MILLERIE | Graines oléagineuses | 20 000 | Tourteaux | 6 300 | Alimentation animale | Récupération préliminaire de l'huile par solvant |
| | | | Coques Rafles, fibres amandes | 8 200 3 000 600 | Combustible Combustible Exportation | - - Extraction sur place de l'huile |
| SUCRERIE | Sucre | 110 000 | Bagasse | 330 000 | Combustible | - |
| | | | Ecumes Melasse | 30 000 43 000 | Fertilisant Fermentation alcoolique | - - |
| CONSERVIERIE | Fruits, légumes, Viandes | 3 400 | Divers | 200 | - | Fermentation méthanique |
| ABATTOIR | Animaux (Nombre) | 90 000 | Viande salée et sang | 500 | Alimentation animale | - |
| | | | Divers | 900 | Fumure organique | - |
| PECHEURIE | Poissons, crustacés | 3 400 | Divers | 340 | - | Farines pour alimentation animale |
| TRAITEMENT DU SISAL | Fibres | 20 000 | Déchets | 60 000 | Méant | Matière de base (50 %) dans la préparation d'engrais organo-biologique. |

(14) Source : INSEAE - Tananarive.

Figure 1 - Schéma d'ensemble de la production de la biomasse et de son utilisation.

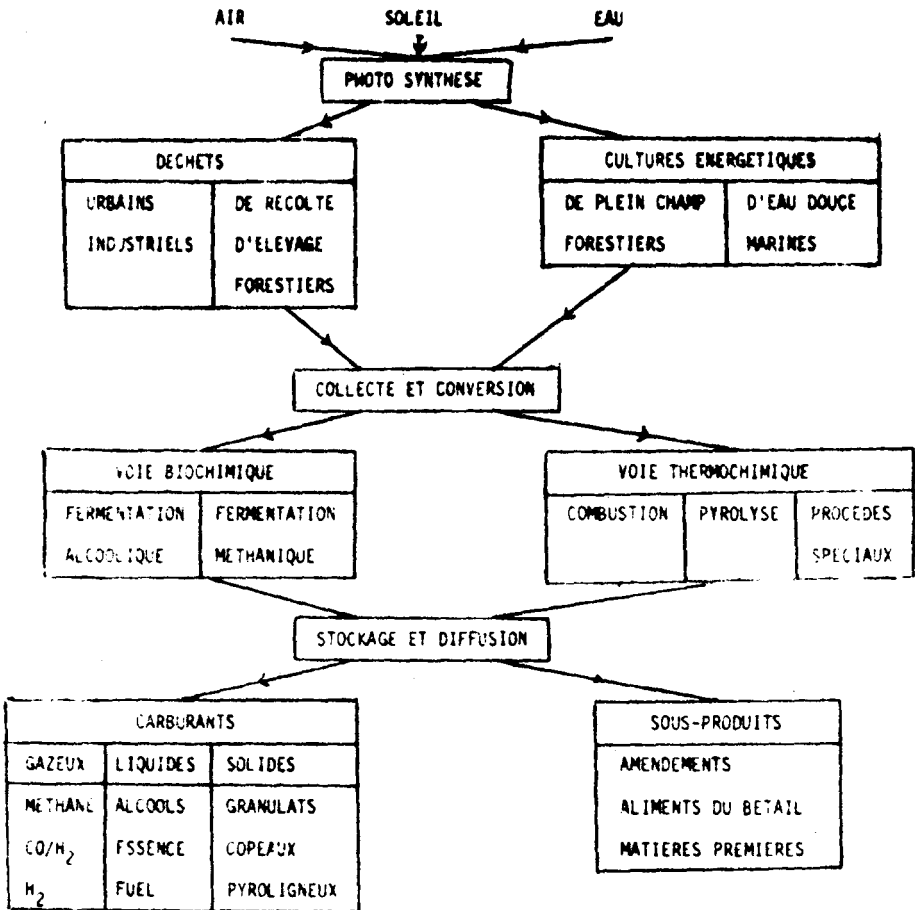


Figure 2 - Suggestion d'un procédé de production de carburants et de produits chimiques à partir de canne à sucre ou de manioc et des graines oléagineuses.

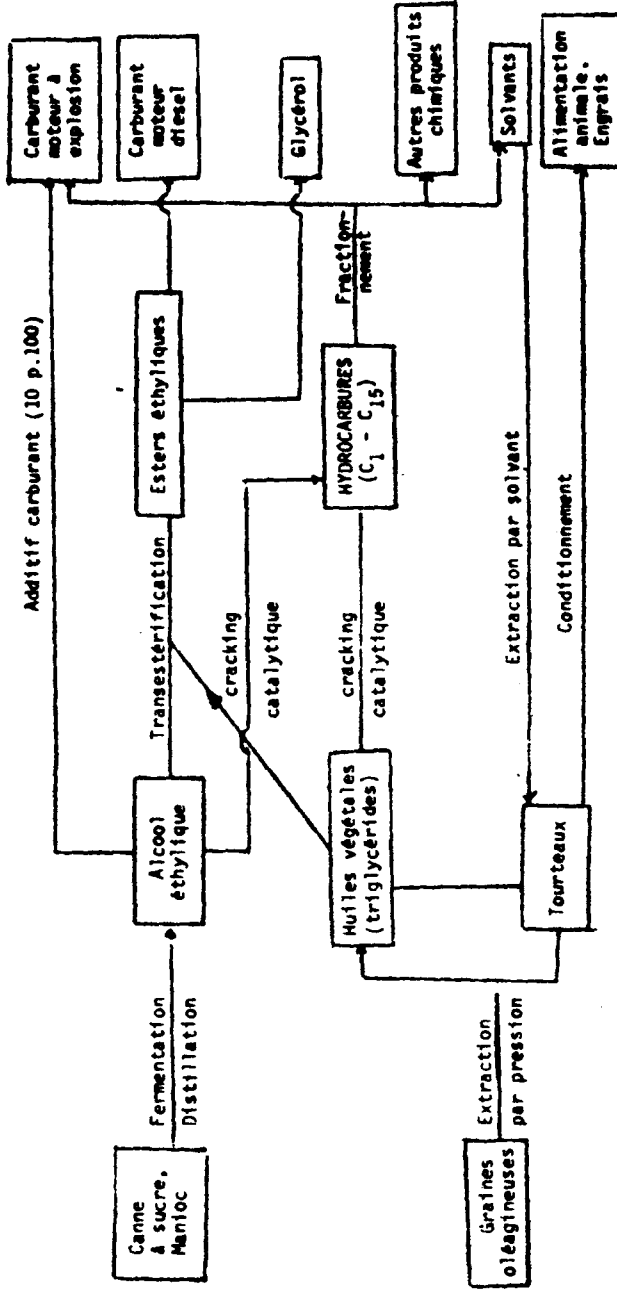
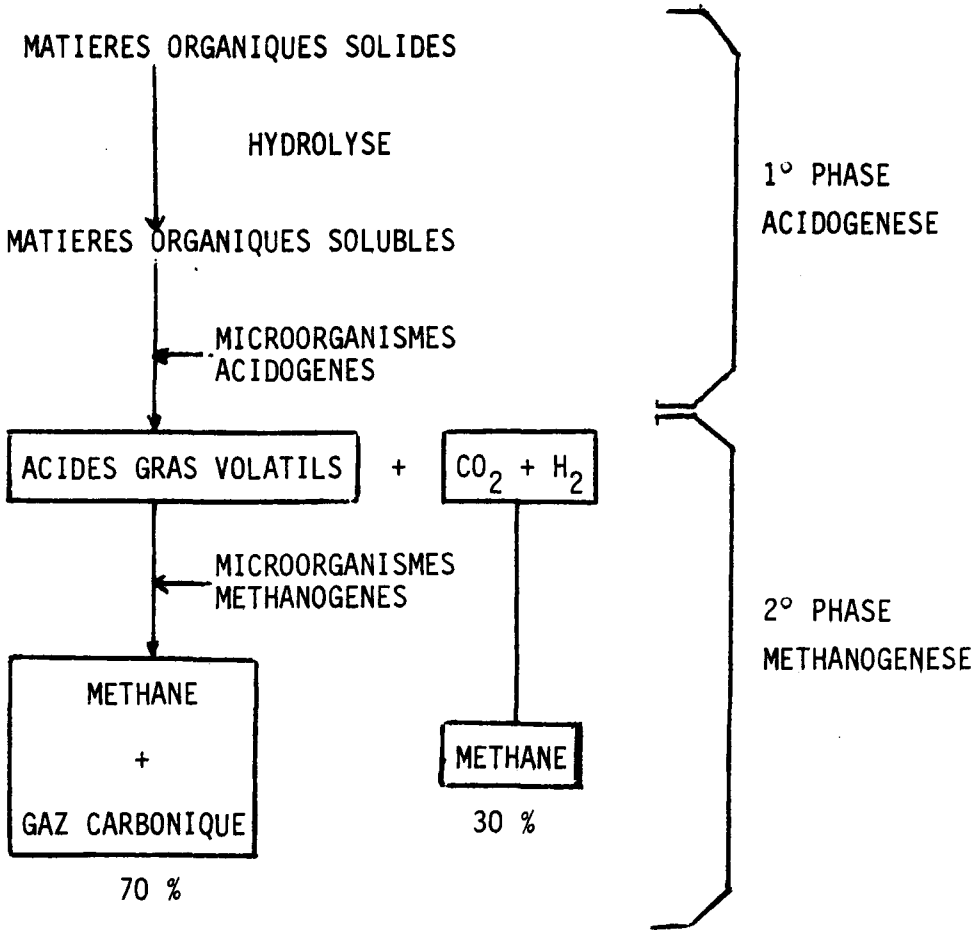


Figure 3 - Schéma réactionnel de la fermentation méthanique.



R E S U M E

Les procédés de conversion de la biomasse en énergie peuvent être soit thermo-chimique soit biochimique. La première voie permettrait la valorisation des graines de ricin, d'aleurites et de purghère, cultivées à Madagascar, en vue d'obtenir des huiles industrielles qui pourraient être soit utilisées après raffinage comme source de carburant pour moteurs Diesel, soit transformées par craquage catalytique pour donner des mélanges d'hydrocarbures utilisables comme carburants de substitution ou comme matières premières pour l'industrie chimique.

Quant aux deux filières de traitement biochimique, la conversion des hydrates de carbone de la canne à sucre, cultivée en milieu rural, et de la mélasse obtenue en milieu industriel, permettrait d'obtenir de l'alcool éthylique qui serait utilisé en mélange avec l'essence. La fermentation méthanique, dont les principales caractéristiques sont passées en revue, constitue d'autre part une voie chargée d'avenir. Menée sur les eaux résiduaires et les sous produits des nombreuses industries agricoles et alimentaires, elle cumule les avantages de la dépollution, de la production d'énergie et d'engrais. On a calculé les quantités de méthane récupérables à partir des vinasses de distillerie de mélasse. De plus, appliquée à certains végétaux, aux déchets agricoles et animaux récoltables, la bioconversion méthanogène est susceptible de constituer une source d'énergie intéressante en milieu rural et devrait apporter une solution satisfaisante au remplacement du bois traditionnellement utilisé pour les besoins ménagers.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. ALVIM P. et ALVIM R. (1979) - *Oléagineux* 34, n° 10
p. 465 - 472.
2. ENGELBEEN D. (1946) - *Bull. Agric. Congo Belge*, 37,
255.
3. WORMS P. (1951) - *Oléagineux* 6, n° 8 - 9
p. 495 - 498.
4. POISSON R. (1978) - *Rev. Fr. Corps Gras*, 25, 539.
5. LAROCHAS L. (1948) - *Oléagineux* 3, n° 6 - 7
p. 321 - 328.
6. FRANÇOIS R. (1947) - *Oléagineux* 2, n° 6 p.304 - 310
et (1948) - 3, n° 12 p. 602 - 606.
7. WALTON T. et PANDLER W. (1981) - *Fuel* 60, 650.
8. WEISZ P., HAAG W. et RODEWALD P. (1979) -
Science 206, 57.
9. WEISZ P. et MARSHALL J. (1980) - *Fuels from bio-*
mass. Ed. M. DEKKER.
10. GRAILLE J., LOZANO P., GENESTE P., GUIDA A. et
MORIN D. (1981) - *Rev. Fr. Corps Gras*, 28, 421.
11. CHERRY L. (1979) - *World crops* 31, 75.
12. NEELAKANJAN et MANIMEGALAI G. (1977) - *Madras*
Agric. J. (India) 64, 419.
13. BOITEAU P. (1979) - *Précis de matière médicale*
Malgache (La Librairie de Madagascar) p.8.
14. MORGAN R. et SCHULTZ E. (1981) - *Chem. Eng. News* 69.

15. MENSIER P. et LOURY M. (1950) - *Oléagineux* 5, n°3
p. 167 - 170.
16. SCHULTZ Jr, MORGAN R. et DRAPPER H. (1980) - *Oil-seeds for energy in rural areas of developing countries* - Oct. 1980 - *Symposium of International Association for the Advancement of Appropriate Technology in Developing Countries*.
17. RABEZANDRINA R. (1981) - *Entropie* 98, 23.
18. TOERLEND D. (1967) - *Water Res.* 1, 147.
19. BALCH W., FOX G., MAGRUM L., WOESE R. et WOLFE R. (1979) - *Microbiol Rev.* 43, 260.
20. GOMA G. et YMAEGOT T. (1981) - *Entropie* 98, 112.
21. BUSWELL A. et MULLER H. (1952) - *Industrial and Engineering Chemistry* 44.
22. VASCONCELLOS J., BERRY J., WEBER C., BEMIS W., et SCHEERENS J. (1980) - *J. Amer. Oil Chem. Soc.* 57, 130.
23. COUPLLET P. et ALBAGNAC G. (1978) - *Ann. Techn. Agric.* 27, 533.
24. JAUMOTTE A. et LEDUC B. (1981) - *Entropie* 98, 68.
25. KNOL W., VANDERMAST M. et de WAART J. (1978) - *J. Sci. Fd. Agric.* 29, 1.
26. MORFAUX J., ALBAGNAC G. et TOUZEL J. - *Colloque International Agriculture et Energie - Paris* Fév. 1980 - *Cahiers du C. E. N. E. M. A.*
27. KEENAN J., KORN I. (1977) - *Biotechnology and Bioengineering* 867 - 878.
28. LESCURE J. et BOURLET P. (1978) - *Sucrerie Française* 99 (Mars).

29. BOULENGER A. (1979) - *Ind. Ag. Al.* 9, 10, 997.
30. ANDERSON G. et DONNELLY T. (1977) - *Public Health Eng.* 5, 64.
31. BORIES A. (1980) - *Ann. Technol. Agric.* 29, 509.
32. GHOSE T. K. (1977) - *Adv. Biochem. Eng.* 6, 39.
33. KOBAWILA S. et MIWIG A. (1981) - *Entropie* 98, 79.
34. LESCURE J., CHANDEGRIS J. et OGER P. (1982) - *Ind. Agr. Al.* 99, 3, 123.