

## Les sources futures des matières premières organiques. Point de vue économique \*

Par le Professeur Dr Herbert Grünewald

(Président du Directoire de Bayer A. G. Leverkusen)



On pensait, il y a encore peu de temps, qu'il y aurait toujours suffisamment de matières premières organiques et minérales, et que leur exploitation ne serait ralentie que par le coût des opérations minières et de leur extraction.

C'est le rapport du Club de Rome, publié en 1972, et ensuite la crise pétrolière de la fin de 1973 qui nous ont rappelé que les ressources terrestres, quoique très grandes, étaient en vérité limitées.

Dans la période pré-industrielle, toutes les matières organiques utilisées par l'homme tels la soie, le coton, le cuir, et même les colorants, étaient d'origine végétale ou animale. Pratiquement toutes provenaient de la photosynthèse avec une contribution réduite de l'homme. Elles étaient régénérées, année après année, sans aucune nuisance pour l'environnement.

Vers la fin du 19<sup>e</sup> siècle, alors que l'industrialisation a pris de la vitesse et que la demande s'est élevée, il a été plus économique de se tourner vers d'autres sources de matières premières. La jeune industrie chimique a commencé à utiliser deux produits de la photosynthèse stockés il y a des millions d'années : le charbon et le pétrole. Ces produits, bon marché à l'extraction, mais néanmoins limités en quantité, ont été utilisés avec une vitesse croissante.

On a souvent dit, à la fin de 1973, quand les pays de l'OPEP ont inauguré une nouvelle politique des prix et que celui du pétrole a augmenté de plus de 200 %, que c'était le début d'un changement fondamental dans le choix des matières premières de l'industrie chimique. On a craint qu'une sévère réduction de la demande en biens de consommation et le remplacement de produits chimiques par d'autres matières ne limitent le développement de la croissance économique. On a même craint qu'elle ne fasse place à un processus de déclin industriel et de baisse du niveau de vie.

Le pessimisme qui prévalait en 1973 a, depuis, évolué vers une attitude plus réaliste. Mais le doute et les incertitudes causés par la crise du pétrole ont eu une influence croissante sur les attitudes, les calculs de profits et les décisions. Il est évident que les disponibilités et les prix futurs des matières premières auront un impact fondamental sur la croissance économique des années à venir.

\* Conférence mondiale sur les sources futures de matières organiques. Toronto (Canada), 10-13, juillet 1978.

## Demande toujours en hausse pour les produits à base de matières premières organiques

Il nous est maintenant impossible d'imaginer la vie dans les nations industrialisées ou dans les pays en voie de développement sans les produits de l'industrie chimique. En pratique, la seule source exploitable pour répondre à la demande présente en produits chimiques organiques est, dans l'état actuel de la technologie, celle des matières organiques fossiles. On ne sait produire qu'une petite quantité de ces produits chimiques à partir de sources renouvelables.

On doit donc inévitablement commencer à discuter de l'approvisionnement des matières organiques en s'interrogeant sur leur disponibilité et sur le temps qu'il faudra aux gisements pétroliers, de gaz naturel, ou de charbon, pour être épuisés.

Selon l'avis de différents experts, on estime généralement que les approvisionnements en pétrole et en gaz naturel dureront trente à quarante ans, tandis que les stocks de charbon dureront encore trois à cinq cents ans (1).

Ce n'est donc que dans un avenir très lointain qu'il sera nécessaire de passer, pour la synthèse des produits organiques, à l'utilisation de matières premières renouvelables ou de carbonates minéraux. La figure 1 montre le type d'utilisation des matières premières et de l'énergie au cours de l'histoire.

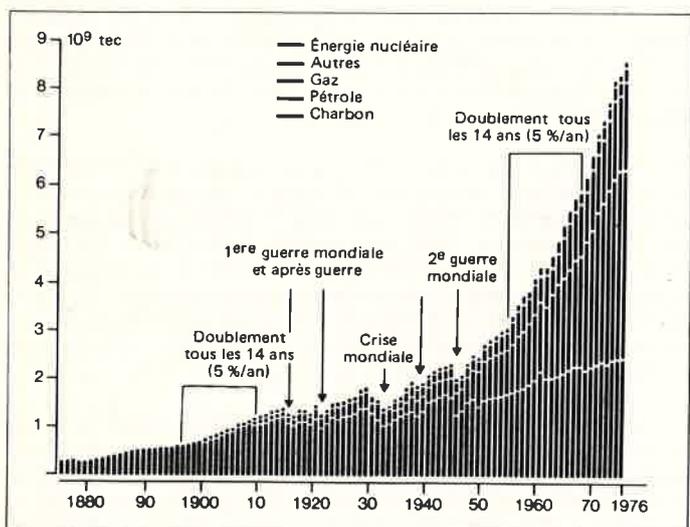
A l'heure actuelle, nous nous trouvons plus ou moins au point d'utilisation maximale du pétrole.

## Matières premières organiques et énergie

### Un seul problème pour l'industrie chimique

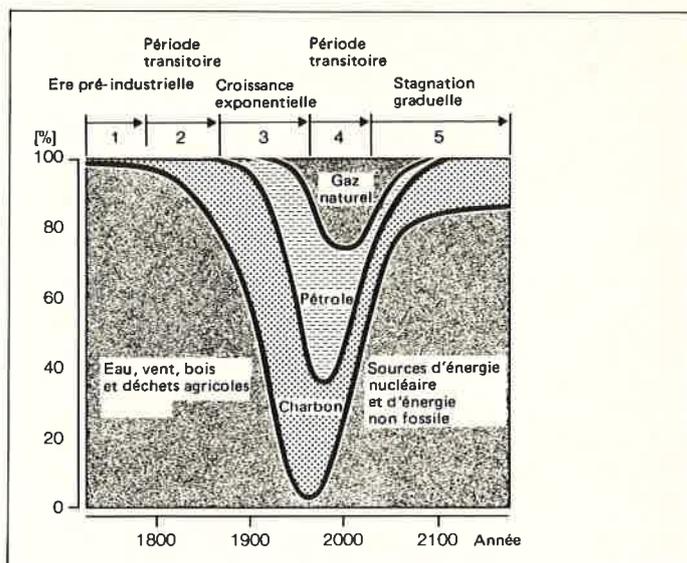
Pour l'industrie chimique, la disponibilité en matières premières organiques et la fourniture de l'énergie nécessaire à leur transformation constituent presque le même problème. Le pétrole, le gaz naturel et le charbon, produits à haute teneur en carbone, ne constituent pas seulement la base de la synthèse chimique organique, mais sont également la principale source mondiale d'énergie. Il est donc important de toujours garder en vue la situation de l'énergie quand on envisage la disponibilité des matières premières organiques. La figure 2 montre la consommation mondiale d'énergie depuis le début de l'ère industrielle et la croissance sérieuse de ces vingt dernières années.

On prévoit une augmentation considérable de la consommation énergétique jusqu'à l'an 2000, principalement dans les pays en voie de



**Figure 2. Développement de la consommation mondiale de l'énergie.**

(Source : *Chemie in unserer Zeit*, 1977, 11, 133)

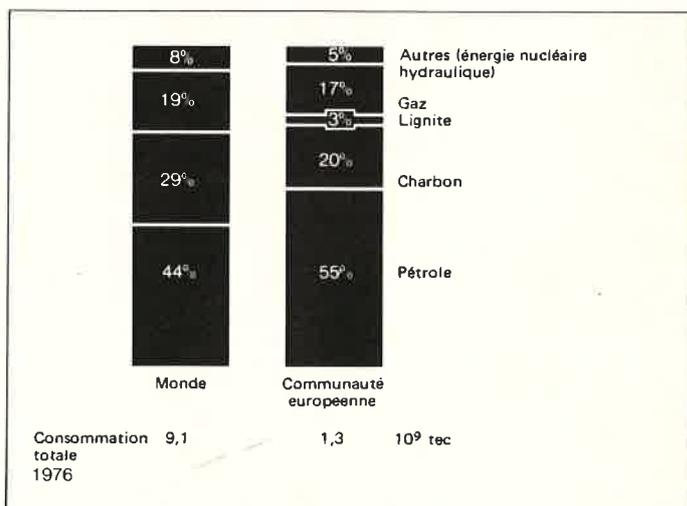


**Figure 1. Utilisation des matières premières fossiles et de l'énergie.**

(Source : T. Bohn, St-Rath-Nagel, *Erdöl und Kohle*, 1976, 29, 347.)

développement. Cette consommation qui continuera aussi à doubler tous les 14 ans dans les pays industrialisés, paraît invraisemblable. Il est plus probable qu'un ralentissement de la croissance économique, joint aux efforts d'économie d'énergie, s'y opposera (2).

Aujourd'hui, les sources variées d'énergie justifient les pourcentages très différents de production d'énergie primaire.



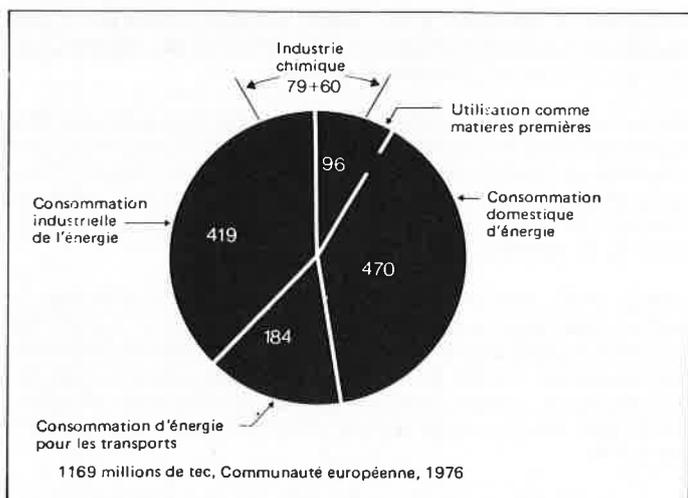
**Figure 3. Contribution des différentes sources énergétiques à la production totale de l'énergie.**

(Source : Statistik der Energiewirtschaft 1976/77. Verein der Industriellen Kraftwirtschaft, Energiewirtschaft der EG, Tafel 138.)

44 % de la consommation mondiale de l'énergie et 55 % de celle de la Communauté européenne sont basées sur le pétrole.

L'industrie dépend fortement des combustibles fossiles en tant que source énergétique et en tant que fournisseur de matières premières.

De la dernière consommation énergétique de la Communauté européenne, qui équivaut à 1 169 millions de tonnes de charbon,

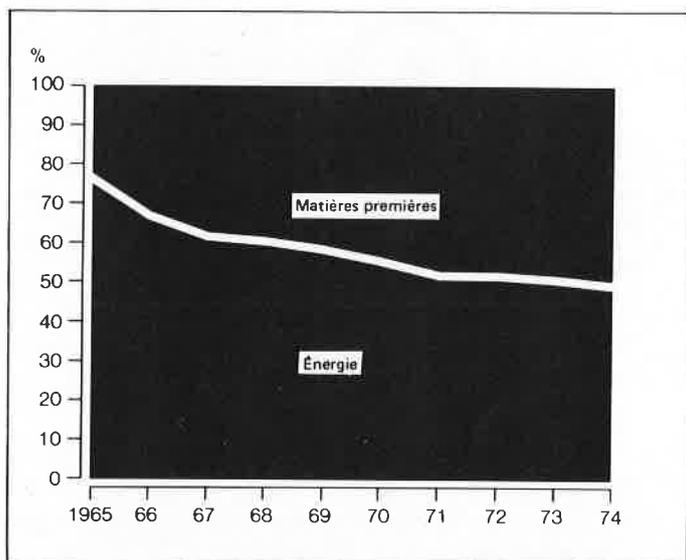


**Figure 4. Utilisation des sources énergétiques. Part de l'industrie chimique.**

(Source : Statistik der Energiestatistik 1976/77. Verein der Industriellen Kraftwirtschaft. Energiestatistik der EG, Tafel 140.)

l'industrie chimique en prend environ 12%. En 1976, elle a consommé l'équivalent de 79 millions de tonnes de charbon sous forme d'énergie et 60 millions de tonnes comme matières premières.

Dans l'industrie chimique, l'énergie est principalement utilisée sous la forme d'électricité et de vapeur. Les besoins électriques de l'industrie sont satisfaits presque exclusivement par des centrales électriques à turbines à contre-pression avec, comme conséquence, la



**Figure 5. Apports énergétiques et de matières premières à l'industrie chimique.**

(Source : VDI-Berichte, 1977, N° 277, 178.)

## Assurer l'approvisionnement en matières premières par des changements de structures

Il n'est pas inhabituel ou inconnu dans l'industrie chimique de passer d'une matière première à une autre. Maintes fois elle a dû s'adapter rapidement aux changements dans la situation des matières premières et modifier ses procédés pour recourir à des matériaux moins chers.

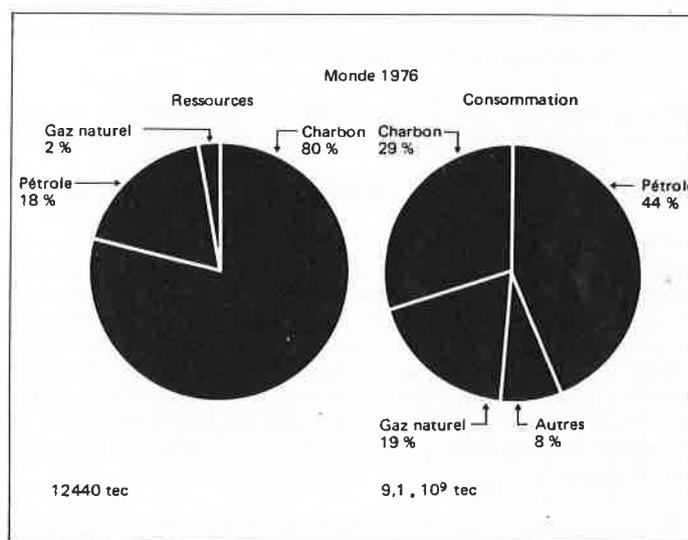
Pour se rendre compte de la situation actuelle, il est utile de rappeler que, ces trente dernières années, la production de produits chimiques de base à partir du pétrole et du gaz naturel a augmenté de plus de dix fois et que 95% des produits fabriqués avec ces produits chimiques

production simultanée d'électricité et de vapeur pour les procédés chimiques. L'industrie chimique, où cette pratique a été employée depuis plusieurs décades, a ainsi largement répondu à l'un des buts des nombreux programmes nationaux énergétiques pour l'amélioration de l'utilisation des combustibles fossiles dans la production simultanée de puissance et d'énergie.

Une comparaison de la consommation des matières premières organiques par unité de production et la consommation correspondante d'énergie montre que la consommation spécifique d'énergie des procédés chimiques est tombée de 77% en 1965 à environ 48% en 1974 (3).

Ce changement, en importance relative, provient partiellement de la croissance de la pétrochimie, qui a relativement de faibles besoins en énergie, principalement par des rendements améliorés et par la récupération d'énergie. Il est probable que la part de l'énergie, dans la fabrication des produits chimiques, baissera encore dans les années à venir grâce aux mesures prises pour améliorer les échanges de chaleur et à l'isolation thermique.

Si l'on compare l'importance des gisements et la consommation totale des matières organiques, on constate une disproportion marquée.



**Figure 6. Ressources mondiales et consommation de pétrole, de gaz et de charbon.**

(Source : Steinkohle, Daten und Tendenzen 1976/1977 vom Gesamtverband des Deutschen Steinkohlenbergbaus.)

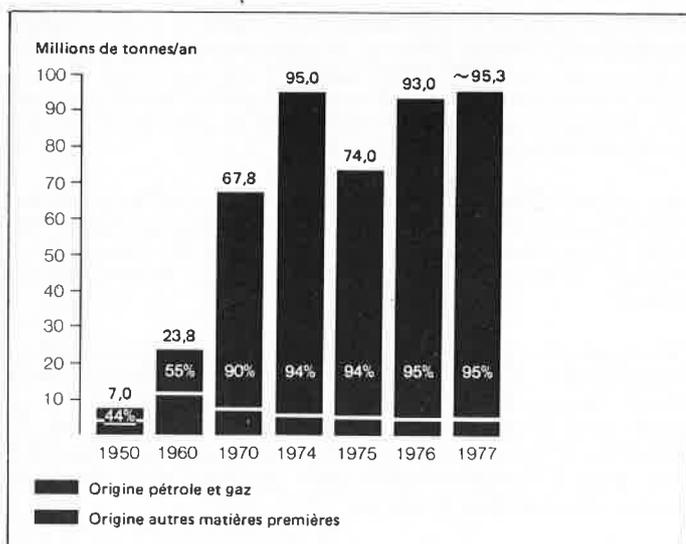
Alors qu'ils représentent seulement 20% des ressources mondiales de combustibles organiques restants, le pétrole et le gaz naturel représentent 63% de la consommation courante.

La situation des matières premières ordinaires et de l'énergie peut, en fait, être caractérisée en deux phases :

- L'homme dépend fortement des matières organiques fossiles.
- Il y a une profonde disproportion entre l'importance des réserves et la consommation des ressources particulières.

de base sont dérivés de ces deux matières. Ce développement n'a pu avoir lieu que parce que le gaz naturel et l'essence de première distillation (naphta), de manutention facile et commodes à traiter, étaient disponibles à une échelle suffisamment grande, souvent comme produits bon marché. On ne trouve plus que les aromatiques polynucléaires, le naphtalène et l'antracène qui aient le charbon pour origine.

Aujourd'hui la disponibilité du pétrole est suffisante, la capacité de



**Figure 7. Production mondiale des produits chimiques organiques (sauf U.R.S.S., Chine, Europe de l'Est).**

(Source : Chemical economics handbook. Stanford Research Institute, Chemiewirtschaft in Zahlen, Verband der Chemischen Industrie eV, Statistical year book, Nations-Unies.)

raffinage réelle n'est totalement utilisée et, dans quelques cas, les prix des produits pétrochimiques ne couvrent pas le coût de la

## Pétrole et gaz naturel, produits actuellement non remplaçables

En dépit des tendances actuelles, les positions du pétrole et du gaz naturel en tant que matières premières ne seront pas sérieusement menacées dans les prochaines années. Je suis convaincu que dans une dizaine ou vingtaine d'années (période qui nous concerne particulièrement ici) la seule alternative au pétrole et au gaz naturel sera le gaz naturel et le pétrole. Il sera cependant nécessaire, durant cette période, de nous adapter aux changements imminents. Les prix du pétrole continueront certainement à grimper et, pour commencer, ce fait sera alors susceptible de nous cacher des pénuries qui commencent à apparaître.

L'élévation des prix de revient, par suite des difficultés à prospecter et à extraire dans des régions géographiquement inhospitalières (Alaska, Mer du Nord, plateaux continentaux, etc.), amènera une augmentation des prix dans un proche avenir.

Un autre facteur déterminant, et dont les effets se sont déjà fait sentir, est la politique des pays de l'OPEP. Ces derniers se proposent de réglementer leur prix pour qu'au moment de l'épuisement final de leurs stocks, leurs pays soient industriellement et économiquement bien développés. Ce qui aura des conséquences importantes pour les nations industrialisées et pour la localisation future de l'industrie.

Quelles sont les possibilités de prolonger les ressources mondiales en pétrole et en gaz naturel, et de continuer à utiliser les usines chimiques existantes aussi longtemps que possible ?

- Actuellement, environ 6 % seulement de la production du brut sont utilisés dans les procédés pétrochimiques pour la préparation des oléfines, des aromatiques et des gaz de synthèse. Les centrales électriques, le chauffage domestique et les moteurs à combustion en consomment 94 %.

On doit donc saisir toutes les possibilités pour réserver à l'industrie chimique une proportion de plus en plus grande du pétrole mondial, matière première dont le carbone et l'hydrogène sont déjà idéalement combinés. De telles possibilités n'arriveront que si l'industrie électrique se tourne de plus en plus vers le charbon, l'énergie nucléaire et l'énergie solaire. On fait partout des efforts pour augmenter la durée des biens de consommation, et le recyclage des matériaux en augmentera l'effet.

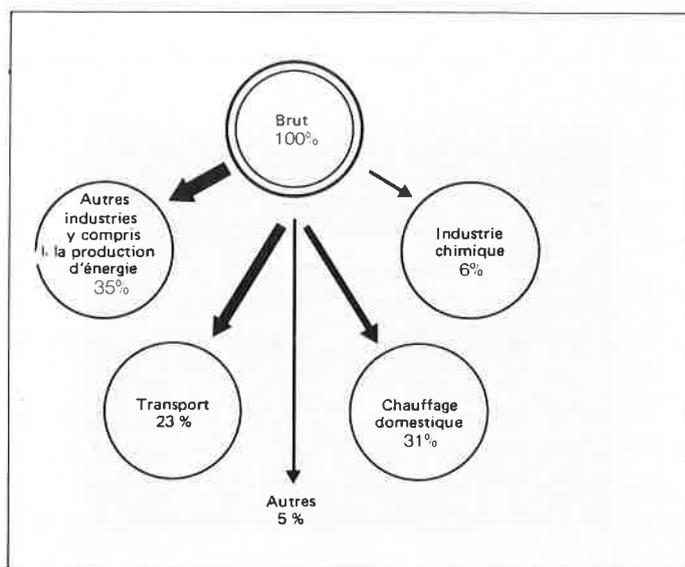
- Une production supplémentaire de pétrole proviendra de l'exploitation secondaire et tertiaire des champs pétroliers ordinaires dont

production. Cependant, à la longue, on doit s'attendre à des augmentations prochaines du prix du pétrole, du gaz naturel et de leurs produits pétrochimiques.

Dès lors, on verra prochainement des tentatives pour rechercher des sources nouvelles de matières premières pour les produits chimiques. Le secteur de l'énergie est différent, là les schémas de réponse à une demande toujours croissante sont encore en discussion. L'industrie chimique sera longtemps dans une meilleure position pour ce qui concerne les matières premières.

Comme on le verra plus loin, l'industrie chimique a déjà dans le charbon une base de matières premières prouvées à laquelle on pourra faire appel dans le cas de fortes augmentations imprévues du prix du pétrole. Autant dire qu'on peut maintenant s'attendre au développement suivant, certaines phases se faisant en parallèle, tandis que d'autres coïncideront simplement sur des périodes limitées (4) :

Dans une phase initiale, se prolongeant jusqu'en 1984/1985, on travaillera beaucoup à une meilleure utilisation du brut pétrolier comme source de matières premières. Une seconde phase, commençant environ en 1988/1989, verra l'amplification de l'orientation vers la chimie du charbon. Une troisième phase, commençant après 1990, sera marquée par l'utilisation supplémentaire des schistes bitumineux et des sables pétrolifères. Une quatrième phase sera caractérisée par la commercialisation, à grande échelle, de la fabrication de produits chimiques à partir des biomasses, ce qui ne devrait pouvoir se réaliser qu'après l'an 2000.



**Figure 8. Utilisation finale du pétrole.**

(Source : BASF-Intern 2/1978).

on n'extrait, actuellement, qu'environ 30 % du pétrole. Une autre part viendra de l'utilisation des sables pétrolifères et des schistes bitumineux, sans intérêt commercial en 1973 quand le prix du baril de brut n'était qu'à 3,20 \$. Dans l'intervalle, le prix du brut a atteint 10-12 \$ le baril. On a calculé qu'à 15-18 \$ il serait économique d'exploiter les gisements des vallées des fleuves Green et Athabasca (6).

- L'essence de première distillation (naphta) qui est la principale source d'approvisionnement des industries de l'Europe de l'Ouest et du Japon à partir de combustibles fossiles, devient rare et chère. Les fractions de pétrole à plus haut point d'ébullition seront donc utilisées directement pour la production des oléfines (5). Même le brut tel quel peut servir d'approvisionnement.

- Pour la fabrication du gaz de synthèse, le naphta sera remplacé par du gaz naturel et des fuels lourds, changement qui est déjà plus ou

moins réalisé. En outre, le charbon sera de nouveau utilisé sur une grande échelle pour la production de gaz de synthèse, d'ammoniac et de méthanol.

● Il pourrait y avoir ici substitution ultérieure du naphta et de l'éthylène si les produits des séries aliphatiques devenaient disponibles par de nouveaux procédés dans la chimie du gaz de synthèse (l'éthanol, par exemple, peut être obtenu par homologie avec le méthanol).

● D'un autre côté, les rendements en naphta des raffineries augmenteront. De plus, au lieu d'obtenir par simple distillation la fraction naphta, comme on l'a fait jusqu'à présent, les raffineries produiront d'autres quantités de naphta par hydrocraquage, craquages thermique et catalytique des fractions élevées malgré le coût plus élevé de cette opération.

Aujourd'hui, environ 23 % seulement du brut utilisé par les raffineries d'Europe de l'Ouest sont transformés en naphta pour l'industrie chimique et les moteurs des voitures qui se concurrencent.

En principe, on peut montrer que toutes les fractions de brut peuvent être totalement utilisées par l'industrie chimique en comparant les raffineries européennes avec celles des U.S.A. où presque 50 % du brut qui y entre ressort sous forme d'essence.

Les possibilités notées plus haut sont résumées dans le tableau suivant. Les numéros 3 et 4 donnent des exemples de raffineries américaines qui utilisent également du gasoil de pression atmosphérique pour le craquage dans les hydrocraqueurs et dans les unités de craquage catalytique. Le numéro 3 donnerait le rapport éthylène/propylène le plus élevé, et le numéro 4 le rendement le plus élevé en benzène.

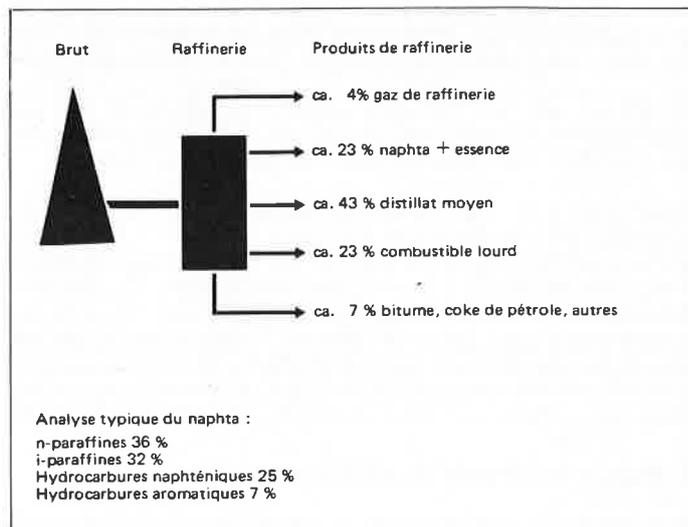
**Tableau I. Utilisation du brut dans des raffineries de types variés**

(Source : R. Steiner, *Chemische Rundschau* du 24.12.1976.)

Type de raffinerie	1	2	3	4	5
Produit de départ pour la pyrolyse	naphta	comme 1, avec gasoil atmosphérique	comme 2, avec craquage catalytique fluide	comme 2, avec des produits de l'hydrocraqueur	comme 4, avec en plus la conversion des résidus
	%	%	%	%	%
Rendements* :					
Ethylène	8,7	16,1	18,9	22,5	26,0
Propylène	4,6	9,1	12,9	12,8	15,0
Butadiène	1,5	2,8	3,1	3,9	4,6
Benzène	2,4	4,0	4,8	5,9	6,8
Toluène	1,7	2,7	4,4	4,0	4,6
Xylène	0,8	1,5	5,2	2,1	2,4
Total : Produits pétrochimiques	20	36	49	51	59
Investissement (indice)	100	130	165	170	200

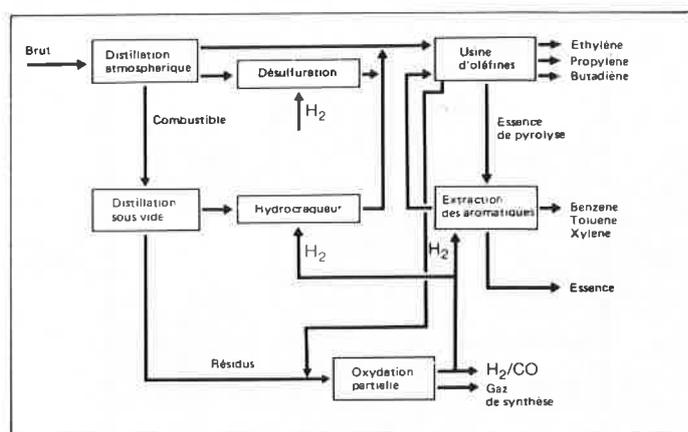
\* Calculé d'après le brut.

Du point de vue de l'industrie chimique, le brut pourrait être employé plus utilement dans la raffinerie pétrochimique du numéro 5 qui possède des hydrocraqueurs et des unités de traitement des résidus. De cette façon, on peut transformer 60 % pour l'alimentation de la chimie.



**Figure 9. Mélange des produits d'une raffinerie type d'Europe de l'Ouest.**

(Source : Bayer AG.)



**Figure 10. Schéma d'une raffinerie pétrochimique.**

(Source : H. J. Madsack, U. Buskies, *Erdöl und Kohle*, 1977, 30, 31.)

Une raffinerie de ce type exige, cependant, un investissement double de celui demandé par une raffinerie pétrolière de l'Europe de l'Ouest. Si nous devons parvenir à un équilibre dans l'utilisation chimique de toutes les fractions pétrolières, on devra trouver des compromis soigneusement étudiés entre l'intérêt de l'industrie pétrolière minière, les besoins pour la fourniture énergétique et ceux de l'industrie chimique.

Avec autant de sous-produits dans la chimie organique, l'installation par les industries chimiques et pétrochimiques d'un réseau de distribution international, comme on l'a réalisé ces vingt dernières années, a atteint son but en réduisant fortement les coûts. Cependant les procédés de substitution, dont j'ai fait mention, rompent l'équilibre en rendant certains produits plus chers et en nécessitant une certaine correction par rapport aux quantités disponibles. C'est un principe de l'économie du marché libre que, dans la fabrication d'un produit particulier, l'utilisation de matières premières plus chères ou de procédés à coût de production plus élevé ne peut pas être envisagée avant que le prix de ce produit ne justifie les dépenses supplémentaires. D'autre part, si les matières premières deviennent plus chères, il y a une raison d'en améliorer leurs utilisations et de développer des procédés de fabrication plus rationnels. La crise du pétrole de 1973 a vérifié cette estimation. Il en est résulté une recherche intensive des possibilités de substitution, malgré la disponibilité encore suffisante du pétrole et du gaz naturel. Sans la crise du pétrole, on n'aurait probablement pas poursuivi, avant longtemps, des recherches de ce genre à une aussi grande échelle.

Pour une meilleure utilisation des stocks existants, on a suggéré que les gaz des torchères soient transformés en méthanol pour une utilisation énergétique, comme combustible pour moteurs à carburateurs, ou comme charge chimique. On a calculé que pour le secteur énergétique cela ne serait pas rentable. Il est moins cher de transporter ces gaz sous forme liquide ou par conduites spéciales car leur rendement thermique est plus élevé que celui du méthanol.

Néanmoins, il y a de bonnes perspectives dans l'addition de méthanol à l'essence auto, dans la proportion de 5-15 %. Bien que le méthanol ait des inconvénients tels qu'un faible pouvoir calorifique et une toxicité élevée, il a un indice d'octane élevé (7). Une telle utilisation du méthanol pourrait tant soit peu atténuer la rareté des aromatiques. Pour l'approvisionnement à long terme en essence auto, la transformation catalytique du méthanol en hydrocarbures en présence de nouveaux types de zéolithes, procédé mis au point par Mobil Oil, est de la plus haute importance. Les essais en pilote de

Mobil ont été achevés au début de 1978 et maintenant la société envisage la construction d'une usine dans laquelle le procédé sera utilisé à l'échelle semi-industrielle. Il ne devrait y avoir aucun problème dans l'industrie chimique à utiliser le méthanol, provenant des gaz de torchères ou du charbon, où il serait substitué aux quantités venant jusqu'ici du pétrole. On pourrait également utiliser le méthanol de cette provenance à des buts entièrement nouveaux pour ce composé, par exemple pour la fabrication de protéines de synthèse.

On ne peut se contenter de voir le côté technique des efforts pour réduire la combustion de pétrole et du gaz, pour les réserver à l'industrie chimique qui est actuellement entièrement basée sur ces matières. L'augmentation future de la concentration atmosphérique en gaz carbonique peut graduellement changer le climat de notre planète, possibilité qui sera discutée à la Conférence mondiale au début de 1979.

## Retour à la chimie du charbon

Pour réduire la consommation de pétrole, les experts des pays industrialisés se retournent vers le charbon. En principe, tous les produits fabriqués à partir du pétrole peuvent l'être également à partir du charbon.

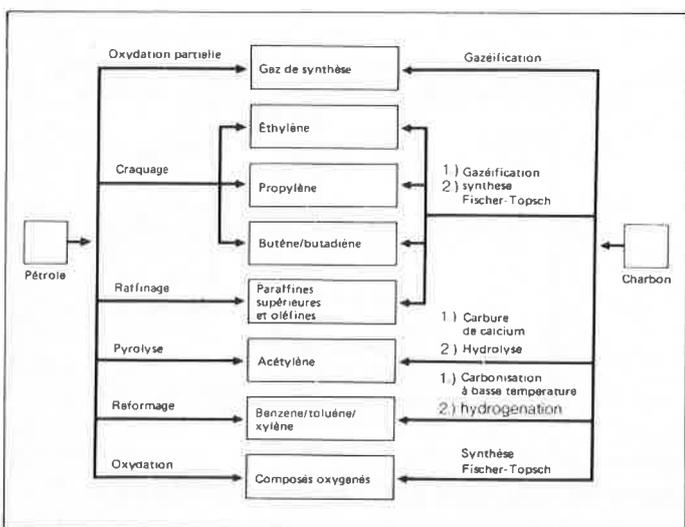


Figure 11. Produits chimiques de base, d'origine pétrole ou charbon.

(Source : *Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium*, 1977, 25, 228.)

A vrai dire, la plupart des produits chimiques organiques actuellement utilisés ont été dans le passé produits à grande échelle à partir du charbon. Le retour au charbon est cependant lié à beaucoup plus de difficultés que le passage, il y a seulement trente ans, du charbon au pétrole. En premier lieu, les techniques du génie chimique basées sur la chimie du charbon doivent être adaptées aux conditions économiques et écologiques d'aujourd'hui. On doit encore rappeler que, dans l'intervalle, la demande en produits chimiques organiques a considérablement augmenté. Bien que les gisements mondiaux de charbon soient assez importants pour permettre au charbon de remplacer le pétrole en tant que source d'énergie et en tant que matière première, et bien que la répartition des gisements de charbon soit plus uniforme que celle des gisements pétroliers, l'exploitation du charbon à grande échelle, comme elle est actuellement dirigée, ne pourrait pas répondre à la demande à court et à moyen terme. Quant à l'Europe de l'Ouest, on a estimé que si, en 1975, on avait complètement remplacé le pétrole dans la fabrication des oléfines inférieures, des aromatiques (BTX), de l'ammoniac et du méthanol, il aurait fallu 250 millions de tonnes de charbon (8). Ce chiffre n'est que très peu inférieur à celui de la production totale, pour cette année, de l'Europe de l'Ouest : 275 millions de tonnes. Il s'ensuit que si l'on veut remplacer totalement la chimie du pétrole, on doit doubler la production de

charbon de l'Europe de l'Ouest. En ne considérant que le seul investissement nécessaire à l'ouverture de nouvelles mines et à la construction d'unités de transformation du charbon pour l'approvisionnement chimique, il faudrait évidemment beaucoup de temps pour réaliser une multiplication de cette importance.

La principale question porte sur les coûts de fabrication des produits chimiques à partir du charbon. Une comparaison économique de la chimie du charbon avec celle du pétrole donne toujours une estimation momentanée de la situation dans une région particulière, pour un site industriel particulier et pour des procédés particuliers ou leurs variantes, et ne peut donc pas être généralisée. Pour cette raison je ne pense pas que ce soit le sujet qui nous intéresse ici. On a déjà beaucoup publié, récemment, de calculs dans le détail. J'essayerai cependant de résumer les faits :

- D'abord, il faut rappeler que le pétrole, le gaz naturel et le charbon ne peuvent trouver en eux-même leur niveau de prix. En d'autres termes, les prix ne répondent pas simplement à la loi de l'offre et de la demande. Dans beaucoup de pays, ils sont influencés par la politique nationale des combustibles et de l'énergie et par l'octroi de subventions à l'exploitation minière ou à l'extraction. Les facteurs normaux du marché peuvent donc être considérablement faussés.
- Parce qu'un produit obtenu par le charbon, pour cette raison, nécessite un plus grand nombre d'étapes, on est conduit à des investissements plus lourds et il est, lui-même, plus coûteux.
- En général, dans la plupart des pays, on peut dire que les produits d'origine charbon sont plus chers que ceux d'origine pétrochimique. Un changement en grand pour le charbon pourrait, en devenant trop coûteux, conduire à perdre beaucoup d'applications de produits chimiques courants et obtenus économiquement.
- Une comparaison des prix du charbon montre la différence qui existe entre les industries des divers pays.

## Tableau II. Charbon, coûts miniers (sans transport)

Allemagne	: 65-68 \$/t.
U.S.A.	: 8-30 \$/t.
Australie	: 10-13 \$/t.
Afrique du Sud	: 5-8 \$/t.

(Source : *Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium*, 1977, 25, 228.)

Le faible prix du charbon en Afrique du Sud provient d'une avance plus importante de ce pays dans la conversion du charbon. L'usine Fischer-Tropsch de la SASOL en Afrique du Sud est la seule au monde qui travaille actuellement à l'échelle industrielle. En Afrique du Sud, on doit également construire une usine d'ammoniac, dont les besoins en hydrogène sont satisfaits par la gazéification du charbon par le procédé Koppers-Totzek, et une usine de carbure de calcium de 300 000 t/an. On prévoit la production de 100 000 t/an d'acétylène et de 80 000 t/an de PVC et d'acétate de vinyle.

● L'économie du procédé Fischer-Tropsch dépend fortement de la variété des produits obtenus et de l'importance donnée au développement des catalyseurs produisant encore plus d'oléfines en C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>, les seules réclamées en principe aujourd'hui. En Europe de l'Ouest, les usines à procédés Fischer-Tropsch ne pourraient actuellement plus fonctionner économiquement. Par exemple, en 1970, le coût en Europe de l'Ouest de la production de naphtha par Fischer-Tropsch valait quatre fois le coût de production de naphtha à partir du brut, ce rapport a depuis diminué pour atteindre 2/1 (9). On doit cependant noter qu'actuellement les prix du pétrole ne sont pas totalement fonction des coûts. Comme une unité Fischer-Tropsch demande un investissement plus élevé qu'une unité de production de naphtha par le pétrole, il y a un plus grand risque financier, même si l'on vend les produits de ces deux procédés aux mêmes prix.

Il y a un autre risque tant que le pétrole reste disponible : le prix du naphtha à partir du pétrole peut diminuer à un certain moment. Il y a eu, durant la seconde guerre mondiale, une autre branche de la chimie du charbon qui a eu son importance, particulièrement en Allemagne, c'est la conversion directe du charbon en produits liquides par hydrogénation. On a utilisé ces procédés pour produire des carburants liquides et non des produits chimiques primaires. Sans aucun doute, on peut produire du benzène, du toluène et des xylènes à partir de produits d'hydrogénation du charbon qui sont riches en aromatiques, et ces oléfines peuvent être fabriquées à partir de composés non aromatiques. Pour pouvoir étudier les coûts des divers procédés on a construit, à nouveau, des installations pilotes aux U.S.A. et en Europe de l'Ouest.

● Il semble que ce soit l'ammoniac, le méthanol, le méthane et peut-être l'éthylène-glycol qui seront les premiers produits qui économiquement vaudront la peine d'être fabriqués à partir du charbon ou du gaz de synthèse. (Actuellement pourtant le gaz de synthèse le plus économique est produit par le méthane venant du gaz naturel). Quant à l'ammoniac et au méthanol, Chem Systems a dernièrement publié des calculs concernant les U.S.A. (10). Vers les années 1980, le procédé de gazéification du charbon de deuxième génération pourrait devenir aussi bon marché que le procédé conventionnel de reformage à la vapeur du méthane, c'est une des conclusions de ce rapport. Quant à l'Europe de l'Ouest, on a estimé que la production du gaz de synthèse d'origine charbon redeviendrait commercialement intéressante en 1985/1987 (8).

● Du fait du coût élevé du charbon extrait en Europe de l'Ouest, on a proposé d'utiliser la chaleur fournie par les réacteurs nucléaires pour la gazéification ou l'hydrogénation du charbon pour remplacer cette part de charbon qui apporte l'enthalpie de la réaction et ne participe pas à la réaction chimique même (11).

La chaleur des réacteurs nucléaires peut être fournie par un cycle hélium ou alternativement par un cycle secondaire, entraînant la réaction :



dans ce cas, elle peut être transportée sur de plus grandes distances.

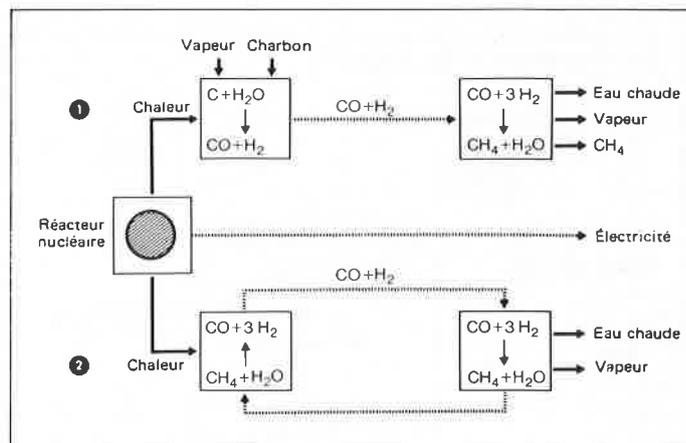


Figure 12. Chaleur produite par le nucléaire.

### 1. Gazéification du charbon et méthanisation.

### 2. Transport de chaleur par scission et synthèse du méthane.

(Source : W. Peters, H. D. Schilling, *Chemiker-Zeitung*, 98, 434.)

Cependant, d'après les essais préliminaires et les études de faisabilité publiées jusqu'ici, une unité de gazéification utilisant la chaleur nucléaire a un coût de fonctionnement à peine moins élevé qu'une unité conventionnelle. Néanmoins, on aurait l'avantage que le prix de l'unité de chaleur resterait plus ou moins constant durant la vie du réacteur qui est de 20-25 ans. Les effets des futures augmentations du prix du charbon sur les prix des produits de la gazéification et de leur dérivés seraient ainsi minimisés. En R.F.A., on prévoit la construction d'une usine de démonstration sur ces principes. On doit, cependant, encore résoudre certaines difficultés relatives aux matériaux de construction.

## Les technologies de traitement des matières premières renouvelables. Option future

Nous sommes conscients de ce que les ressources terrestres de matières premières organiques s'amenuisent lentement mais régulièrement. Ce qui signifie que l'avenir verra une augmentation de l'importance donnée par l'homme à l'exploitation indirecte de l'énergie solaire, par l'intermédiaire des microbes, pour transformer les plantes vivantes en matières premières à partir desquelles on synthétisera les composés organiques. Les principales sources de biomasses sont les déchets organiques industriels et urbains, les surplus et produits récupérés de l'agriculture, les plantes terrestres et aquatiques. Ces dernières peuvent être cultivées soit pour certains éléments spécifiques ou simplement pour leur teneur énergétique. Par comparaison avec la pétrochimie, les techniques de bioconversion sont encore à leur début. Combien faudra-t-il d'années avant qu'elles ne deviennent économiquement fiables ? On peut encore moins prévoir leur compétitivité que le temps qui s'écoulera avant que le charbon ne remplace largement le pétrole.

Bien que la perspective d'un succès rapide soit mince, cette source de matières premières, qui pourrait devenir si importante pour les générations futures, doit être approfondie maintenant, alors que nous disposons des ressources financières dues à notre technologie pétrolière.

On utilise déjà des procédés enzymatiques pour la production de composés à structures particulièrement compliquées, à sensibilité

thermique élevée ou à stéréospécificité particulière, la pénicilline ou l'acide citrique par exemple. Dans ce cas, nous avons des procédés supérieurs en rendement et en bénéfice aux méthodes de production totalement synthétiques.

Pour les produits chimiques primaires importants, les procédés de production biologiques à grande échelle n'ont été développés que pour six composés seulement : éthanol, acide acétique, isopropanol, acétone, butanol et glycérol. Cependant, ces procédés sont en général plus coûteux que leurs correspondants pétrochimiques. En pratique, les seules fois où on les a produits, ainsi que d'autres, par des méthodes biologiques, c'est pour utiliser les surplus agricoles ou les déchets (12).

Dans l'actuelle économie mondiale, la conversion des biomasses en produits chimiques primaires organiques ou en sources d'énergie n'est possible que sous certaines conditions. Ce qui ne va pas sans compétition avec les récoltes alimentaires dans l'occupation des terres. On donnera toujours la priorité aux récoltes alimentaires tant que la population continuera d'augmenter. La production de plantes poussant dans les régions arides, dont on retire des composés spéciaux, est, elle, extrêmement importante.

Le projet sur le guayule au Mexique a montré que cet arbrisseau, qui croît facilement dans les régions extrêmement sèches, peut aider à

L'approvisionnement en caoutchouc naturel de qualité égale à celle de l'hévéa brésilien, et à un prix économique. Des efforts analogues d'exploitation des ressources biologiques englobent la production de souches de colza, dont l'huile est à teneur particulièrement élevée en acide érucique, et la fabrication de nylon 13.13 à partir de cette huile ou d'autres.

Les calculs de faisabilité basés sur les coûts de 1975 ont montré qu'on

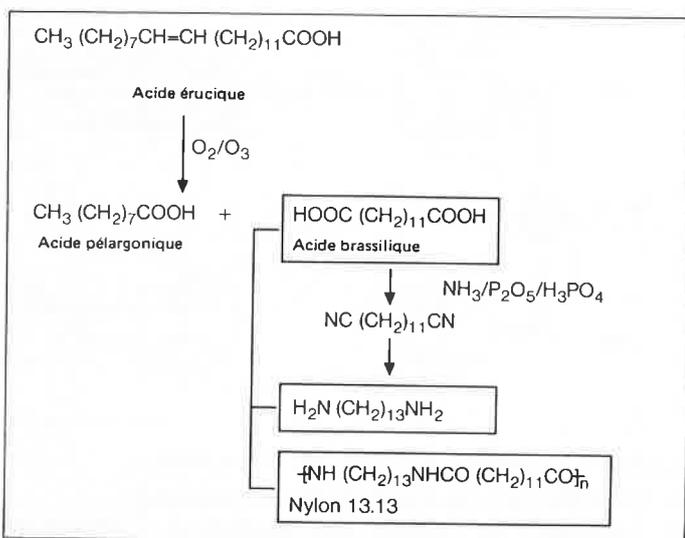


Figure 13. Nylon 13.13 par l'acide érucique.

(Source : H. J. Nieschlag et al., *Ind. Eng. Prod. Res. Dev.*, 1977, 16, 106.)

## Recherche et développement

Dans quelques années, les fonds provenant des technologies, « adaptées » et lucratives, qui sont basées sur le pétrole, seront utilisés plus souvent pour payer la recherche et le développement destinés à assurer les approvisionnements futurs en matières premières.

La recherche de nouveaux produits et de substances actives devra principalement laisser la place aux développements des techniques de traitement les moins coûteuses. De telles techniques devront être non seulement moins dévoreuses d'énergie et de matières premières que les actuelles, mais aussi répondre aux exigences écologiques.

Dans cette idée là, l'étape suivante sera de réactiver le savoir-faire de la chimie du charbon. Des installations pilotes fonctionnent déjà ou sont à l'état de projet dans divers pays du monde, notamment aux U.S.A. et en R.F.A.

Partout où cela sera possible, nous devrions commencer aussi à développer pour les générations futures les technologies qui dépendront entièrement des matières premières renouvelables.

Autre chose de même importance, les matières premières organiques actuelles seront remplacées seulement pour la part qui deviendra rare

## Matières premières et gaspillage de l'énergie. Une grande réserve

Sans aucun doute, l'énorme gaspillage actuel représente une importante réserve de matières premières et d'énergie. C'est le cas, principalement, de la consommation d'énergie, dont les 40 % sont consacrés exclusivement au chauffage. Dans l'industrie chimique, le recyclage des sous-produits, la recherche d'une utilisation pour ces sous-produits qui ne peuvent être recyclés, et le recyclage même de l'énergie par des échangeurs de chaleur sont habituels. La pratique d'ajouter aux bilans commerciaux le bilan de l'énergie deviendra probablement de plus en plus commune pour l'industrie, alors que l'on a jusqu'ici seulement comptabilisé la consommation et les coûts de l'énergie.

En tout premier lieu, la comptabilité de l'énergie donnera une image

peut arriver au prix d'environ 1 \$/livre pour le polymère de nylon (13). On ne dispose pas encore de données sûres pour déterminer s'il serait rentable, à l'avenir, de produire de l'hydrogène par biophotolyse (14) ou de produire du méthane à partir des algues brunes, par l'action de bactéries (15). Ces varechs sont parmi les plantes qui croissent le plus vite. Les études en cours, et les installations pilotes devront apporter quelques réponses.

Si les procédés de bioconversion feront beaucoup pour l'approvisionnement en matières premières organiques, ils dépendront largement de la structure du système économique et des prix dans les pays concernés et de l'importance de ces pays dans le commerce mondial. Dans les pays dont l'infrastructure économique est peu développée, le Brésil par exemple, on s'attache dès à présent à la production d'éthanol à partir de la canne à sucre et à l'utilisation de ce dernier comme additif aux combustibles liquides (16). La comparaison des coûts d'investissement a montré que l'établissement d'une industrie pétrochimique viable est devenu si coûteux que, lorsqu'il y a des surplus agricoles, la bioconversion peut être plus rentable, particulièrement si elle est favorisée par la structure des prix nationaux et par la politique gouvernementale. Espérons que les hommes politiques responsables de l'investissement industriel dans les pays en voie de développement consacreront une forte proportion de leurs rares fonds à ces technologies qui, à long terme, seront plus importantes que les technologies présentes. D'un autre côté, s'ils essaient simplement d'imiter ce qui se passe dans les pays industrialisés, il se pourrait que le pétrole se raréfie avant que leurs investissements ne commencent à être rentables (17).

On devrait recommander aux nations industrialisées d'encourager, pour leur part, les projets relatifs à l'utilisation de matières premières renouvelables dans les pays en voie de développement en apportant le capital et le savoir scientifique et technique. On pourrait, en fait, les considérer comme des projets pilotes à grande échelle dont les résultats pourraient avoir une grande importance pour l'humanité.

et donc sera plus coûteuse. Il est néanmoins important d'agir avant de subir la pression des facteurs économiques, de telle sorte qu'on dispose de nouvelles sources de matières premières et d'énergie, et que l'on puisse développer en temps voulu les technologies appropriées. La consommation actuelle de produits chimiques de base est telle qu'il sera alors seulement possible d'éviter la pénurie durant la phase de transition.

On doit remarquer que ces tâches excèdent les ressources financières des sociétés privées. Les technologies devront être développées et les investissements réalisés dans une prochaine étape même s'il est impossible de prévoir exactement quand les nouveaux procédés deviendront commercialement intéressants. D'un autre côté, l'expérience exigée ne peut être fournie que par les usines qui fonctionnent déjà. Pour réduire les risques financiers qui y sont liés, on devra également accorder, pour la construction et l'exploitation des unités pilotes, des subventions gouvernementales, comme cela existe déjà aux U.S.A. et en Europe occidentale. Il sera également nécessaire de construire des usines de démonstration avec l'aide du gouvernement et, au début, de subventionner les produits des usines prototypes de taille industrielle.

réelle des diverses étapes du procédé et permettra de reconnaître plus facilement là où il sera possible de faire des économies. De plus, on pourra analyser la possibilité de remplacer un matériau ou un type d'énergie par un autre pendant la production et la durée du produit, y compris le recyclage ultérieur. Des comparaisons entre des pays particuliers et les branches de l'industrie indiqueront la manière d'optimiser l'utilisation des matières organiques comme matières premières et source d'énergie.

Dans les années à venir, la comptabilité de l'énergie pourrait vraiment devenir une aide importante aux décisions économiques (18).

## Liberté commerciale des matières premières. Condition préalable la plus importante pour l'utilisation économique de toutes les ressources

Peu de pays industrialisés ont, comme les U.S.A., le Canada et l'Union Soviétique, d'importantes réserves des diverses matières premières. Les cartes de la répartition du pétrole, du gaz naturel et du charbon montrent immédiatement que la plupart des nations industrialisées, en particulier celles de l'Europe de l'Ouest et du Japon, dépendent de leurs importations. La liberté du commerce mondial est donc d'une suprême importance si, comme on l'a déjà dit ici, doit se faire sans problème le passage d'une matière première organique à une autre pour la production de produits chimiques de base. Le protectionnisme ou la formation de cartels des matières premières auraient les pires effets. La situation des matières premières sur les problèmes des pays en voie de développement est devenue le principal sujet des pourparlers qui se sont tenus sous les auspices des Nations Unies, au CNUCED par exemple.

Maintenant, on passe comparativement moins de temps sur des sujets importants tels que le transfert des capitaux, l'industrialisation intensive et la libéralisation de la politique commerciale. Les pays en voie de développement pensent qu'ils sont soumis à une exploitation continue comme à l'époque coloniale. Ils proclament que pour leurs matières premières ils obtiennent des prix inadaptés, qu'ils doivent payer des prix excessifs pour leurs importations et que, dans les deux cas, les prix sont imposés par les pays industrialisés. Ils démontrent aussi qu'une sévère modification du commerce international pour tout ce qui touche aux matières premières aiderait seulement à réduire le fossé qui existe entre la manière de vivre des hémisphères nord et sud. Il n'est pas sûr que des augmentations de prix des matières premières résolvent en fait les difficiles problèmes des pays en voie de développement. Nous devons nous attendre à ce que de telles augmentations aient pour résultat un nivellement à la fois au taux le plus bas de la croissance des revenus des pays industrialisés et à des possibilités réduites pour leurs investissements. Même à moyen terme, cela diminuerait la croissance de la demande en matières

premières dans les pays industrialisés et les possibilités de soutien au développement.

Beaucoup des difficultés des pays en voie de développement viennent de ce que la plupart dépendent seulement de quelques matières premières. Dans les conditions présentes, avec un commerce international important et un développement des technologies toujours plus sophistiquées, c'est surtout le niveau des opérations de traitement qui est responsable du prix des produits finis. Il s'ensuit que la croissance des pays en voie de développement n'est pas possible sur la seule base de la production et du commerce des matières premières. On peut surmonter seulement cette difficulté si les pays en voie de développement diversifient encore davantage leur économie et participent plus totalement à l'échange international des biens et des services (19).

A bien des égards, on constate que le désir des pays en voie de développement pour une plus grande industrialisation s'harmonise avec le souhait d'une meilleure économie possible dans l'utilisation des ressources mondiales. Pour réduire les coûts de voyage par bateau et les pertes causées par la conversion et le transport des matières premières, il peut être nécessaire de déplacer l'industrie de ses sites actuels vers ceux où les matières premières sont extraites ou bien où l'énergie est disponible à des conditions plus favorables. Cependant ce serait un assez long processus et qui prendrait certainement plus d'une vingtaine d'années. L'intérêt des grandes usines pétrochimiques et des futures usines basées sur le charbon dépend beaucoup d'un système commercial efficace tel que celui qui a été graduellement instauré dans le passé par les industries chimiques. La fabrication des produits organiques crée un nombre important de sous-produits. Une utilisation avantageuse de tous ces produits, et des matières premières organiques, n'est possible que s'il existe une possibilité d'échange entre les divers centres de production des matières premières et des sous-produits, elle exige qu'il n'y ait plus de destruction des surplus.

## Pétrole, charbon, matières organiques renouvelables. Modèle d'optimisation mondial

Du fait du changement fondamental des matières premières de l'industrie, il est aujourd'hui à la mode de dire que l'âge du pétrole est suivi de l'âge du charbon, suivi à son tour de l'âge des matières premières organiques renouvelables. Mais le cours réel des événements sera moins simple. Pour ce qui concerne les matières premières organiques, il est probable qu'on utilisera simultanément le pétrole avec le charbon puis avec les matières premières organiques renouvelables plus longtemps qu'on ne peut le croire aujourd'hui. Quelle que soit l'époque, la combinaison dépendra des circonstances économiques. En réalisant et en optimisant ce modèle d'utilisation des matières premières dans le monde, nous devons être guidés non seulement par des considérations économiques, mais aussi par les

besoins justifiés des pays en voie de développement et par la capacité industrielle actuelle des nations développées. Les scientifiques et industriels intéressés au devenir des matières premières organiques mondiales devront être doublement attentifs à l'axiome :

*« Il n'y a pas de solutions simples, il y a seulement des choix intelligents. »*

Nous espérons que le meilleur choix possible sera fait entre les matières premières organiques disponibles et entre les technologies des opérations de traitement.

## Bibliographie

- (1) A.L. Hammond et al., Energie für die Zukunft, Umschau Verlag, Frankfurt 1974, Kap. 14.
- (2) W. Vielstich, *Chemie in unserer Zeit*, 1977, **11**, 131-141.
- (3) H. J. Madsack et al., Rohstoffe chemischer Prozesse, *VDI-Berichte* 1977, 277.
- (4) *European Chemical News*, 2 décembre 1977.
- (5) J. Schulze, *Chemische Industrie*, 1977, **XXIX**, 823.
- (6) H.F. Mark, Vortrag Energie und Rohstoffe, Unkonventionelle Zukunftsforschung in den USA, 22.6.1977, Düsseldorf.
- (7) VW-International Symposium on Alcohol Fuel Technology — Methanol and Ethanol — 21.-23.11.1977 in Wolfsburg.
- (8) H. J. Madsack et U. Buskies, *Erdöl und Kohle*, 1977, **30**, 29-35.
- (9) R. Kühn, et M. Elster, *Erdöl und Kohle*, 1977, **30**, 122.
- (10) *Chemical and Engineering News*, Nov. 21, 1977, p. 17.
- (11) Kohlevergasung mit nukleärer Prozesswärme, Kurzfassung der Studie des Konsortiums GRT, BF, RBW, STEAG, Düsseldorf 1974.

- (12) H.G. Schlegel et J. Barnea, Microbial Energy Conversion, Tagungsunterlagen des Seminars in Göttingen 4.-8.10.1976.
- (13) H.J. Nieschlag et al., *Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev.*, 1977, **16**, 101-106.
- (14) *Nachrichten aus Chemie, Technik und Laboratorium*, 1976, **24**, 548.
- (15) *Industrial Research*, October 1977.
- (16) H. Heitland et al., Anwendung von Äthylalkohol aus Biomasse als Alternativkraftstoff in Brasilien. VW-International Symposium on Alcohol Fuel Technology — Methanol and Ethanol, 21.-23.11.1977, in Wolfsburg.
- (17) D. Hayes, *Europa-Archiv*, 1978, **4**, 111.
- (18) *Chemische Rundschau*, vom 24.3.1976.
- (19) D. Rohwedder, Rohstoffsituation aus weltpolitischer Sicht, *VDI-Berichte*, 1977, N° 277.