

ENVIRONNEMENT ET TECHNICO-ECONOMIE DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS

PARTIE 2 : LA RARETÉ DES RESSOURCES¹

Pierre le Goff et Jabel Labidi*

Laboratoire des Sciences du Génie Chimique, CNRS - ENSIC

La « rareté » des réserves d'énergie est un critère très relatif qui dépend du coût d'exploitation des sources d'énergie. On définit un prix « écologique » de l'énergie (égal à environ 2 à 3 fois le prix actuel), correspondant à l'exploitation, sans limite, de sources d'énergies renouvelables.

Les réserves de minerais naturels d'une dizaine des principaux éléments chimiques seront épuisées dans moins de 50 ans. Les matières premières de l'industrie proviendront alors principalement du recyclage des déchets des diverses activités humaines.

The rarity of energy reserves is shown to be a very relative criterion, which depends on the exploitation cost of the energy sources. An « ecological » price of energy is defined, which is about two to three times the present price, and which corresponds to the exploitation, without limits, of the renewable energy sources.

The natural provision of ten chemical elements will be exhausted during the coming 50 years.

The raw materials for the industries will come essentially from the recycled human scraps.

Les interactions de tout procédé industriel avec son environnement se placent, soit en amont, du fait de la rareté des ressources naturelles utilisées, soit en aval par le rejet de sous-produits et par les nuisances qui en résultent.

Dans la première partie de ce rapport, publiée dans le numéro précédent, nous avons inventorié les nuisances des produits.

Dans cette seconde partie, nous cherchons à inventorier les ressources utilisables et à évaluer leur rareté.

LES INDICES DE RARETÉ

Au cours de ces deux dernières décennies de nombreux auteurs ont cherché à évaluer l'importance des réserves des diverses matières premières consommées par les êtres humains, et en particulier celles des énergies dites non-renouvelables.

L'« indice de rareté » I_R est généralement défini comme suit :

$$I_R = \frac{\text{réserve connue et exploitable en l'état actuel de la technologie}}{\text{consommation totale annuelle}}$$

I_R est donc le nombre d'années restant avant l'épuisement de la réserve, dans l'hypothèse d'une consommation annuelle constante.

Tableau 1 : Indice de rareté en années

| | D'après CME-WAES | D'après RIVM-Mc Kinsey |
|--------------------|------------------|------------------------|
| | Novembre 1981 | Décembre 1991 |
| Charbon et lignite | 200 à 400 | 250 |
| Pétrole | 100 à 200 | 30 |
| Gaz naturel | 150 à 300 | 50 |

Or l'inventaire bibliographique montre que les valeurs de cet indice peuvent varier dans un rapport de un à cinq selon les auteurs. En voici un exemple caractéristique dans le tableau 1. Ce concept même d'indice de rareté suppose implicitement que le prix de marché des énergies restera constant au cours du prochain siècle. Or il est évident que le prix de tout bien économique augmente, à mesure qu'il devient de plus en plus rare... Mais d'autre part les réserves exploitables augmenteront à mesure que l'on pourra accepter un coût d'exploitation plus élevé... etc. Le problème est donc plus complexe. Reprenons-le à la base.

L'HISTOIRE DES COMBUSTIBLES, FOSSILES

Rappelons que la valeur énergétique moyenne des aliments, consommés par chaque être humain est de l'ordre de (3000 ± 1000) kilo calories par 24 heures, ce qui correspond à une puissance énergétique moyenne de 150 watts. D'autre part la puissance moyenne de l'ensemble des activités industrielles au service de l'homme est de l'ordre de 2 kilowatts par personne, cette valeur moyenne étant calculée sur le total des 4 milliards d'habitants de la planète.

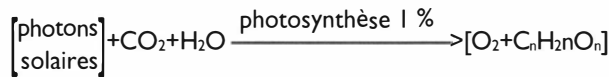
Nota : le même calcul donne 4,4 kW/hab pour le français moyen et 11 kW/hab pour l'états-unien moyen.

Connaissant la superficie totale du globe terrestre (5.10^8 km^2) nous en déduisons la densité moyenne de la population du globe, soit 8 habitants/ km^2 et donc la consommation totale d'énergie par km^2 , soit : $(2 + 0,15) \cdot 8 = 17,2 \text{ kW/km}^2$ c'est le flux de consommation

Rappelons enfin que l'énergie ainsi consommée par l'homme et par ses industries, est encore actuellement, à plus de 90 % de l'énergie solaire fossile c'est-à-dire des combustibles (charbon, pétrole, gaz) résultant de la décomposition de végétaux et d'animaux produits par énergie solaire, il y a quelques millions d'années.

Or le flux solaire moyen reçu par notre planète est d'environ 300 watts/m^2 , ($= 300\,000 \text{ kW/km}^2$) soit 17 400 fois plus grand que la consommation humaine moyenne.

Appelons α la fraction de la surface de la terre couverte par des végétaux, sièges de la photo synthèse, c'est-à-dire de la réaction qui produit des glucides et de l'oxygène, à partir de CO_2 et de H_2O , avec un rendement moyen de 1 %, soit :



Le flux de production de matière organique végétale est : $(300\,000 \times 0,01 \times \alpha) \text{ kW/km}^2$. Nous en déduisons la relation suivante :

$$\frac{\text{Flux de production}}{\text{Flux de consommation}} = \frac{3000\alpha}{17,2} = 175\alpha$$

Pour que le flux de production soit supérieur au flux de consommation, il suffit donc que α soit supérieur à $1/175$.

Si plus de $1/175$ de la surface de la planète est couvert de végétation, le flux de production de matières organiques à partir de l'énergie solaire, est supérieur au flux de consommation de ces matières par les êtres humains.

Or, tel a bien toujours été le cas et l'est encore actuellement, compte-tenu du fait que les photons solaires absorbés par les océans, ont pour effet de produire des algues et autres

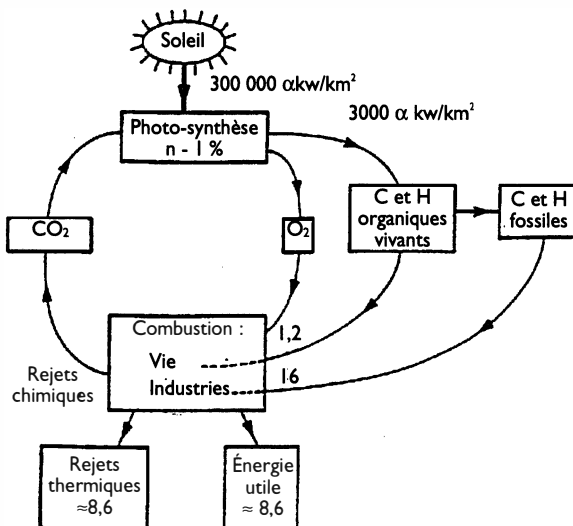


Figure 1 : Le cycle de la photosynthèse et des combustions

micro-organismes vivants, qui sédimentent au fond des mers et se transforment en pétrole... après quelques millions d'années !

La figure 1 montre le cycle de la photo synthèse et des combustions. On y voit que le flux de production de combustibles fossiles est au total, actuellement largement supérieur au flux de consommation même si la durée de cette transformation se mesure en milliers d'années. En effet un régime stationnaire a été atteint de sorte que actuellement, il se produit plus de pétrole, charbon, gaz que nous n'en consommons ! Mais bien entendu, ceci ne signifie pas que les réserves de pétrole, charbon et gaz, économiquement exploitables sont infiniment grandes... Une fraction importante de ces combustibles sont des tourbes, des lignites, des bitumes, des charbons de mauvaise qualité... etc. dont le coût d'exploitation serait supérieur au prix actuel moyen des énergies (équivalent à 20 US \$ par baril).

L'AUGMENTATION DES RÉSERVES DE COMBUSTIBLES FOSSILES AU COURS DU PROCHAIN SIÈCLE

Prenons un premier exemple, celui du pétrole « offshore » extrait de la Mer du Nord. Au prix actuel de 20 \$ le baril, il est économiquement rentable de l'extraire des puits jusqu'à 200 mètres de profondeur. Quand le prix passera à 25 puis à 30 \$ le baril, on ira le chercher jusqu'à 300 mètres puis 500 mètres de profondeur... etc. Un jour on ira jusqu'à 1 000 mètres... Or les surfaces des océans ayant des fonds de 500 ou 1 000 mètres sont beaucoup plus vastes que celles à fond de 200 mètres... En conclusion les réserves de pétrole offshore exploitables ne diminueront pas, mais au contrai-

Tableau 2 : Mode d'utilisation de l'énergie solaire

| Utilisations directes | |
|---|-----|
| Photovoltaïque | ★ |
| Thermique solaire | ○ |
| Chauffage | ○ |
| Climatisation | ★★ |
| Utilisations indirectes | |
| Photosynthèse : Biomasse | |
| Terrestre | ○ |
| Marine | ★★ |
| Fluctuations du contenu énergétique de l'eau | |
| Énergie des vagues | ○ |
| Énergie marémotrice | ★ |
| Différence d'altitude | ★★★ |
| Différence de concentration de sel - mer/rivière | ★★★ |
| Différence de température fond-surface | ★ |
| Fluctuations du contenu énergétique de l'atmosphère | |
| Énergie cinétique | ★★ |
| Énergie thermique | ★★★ |
| Énergie de séchage | ★ |
| Énergie de pression | ○ |

Le nombre d'étoiles traduit notre estimation de l'importance probable relative de ces sources d'énergie

re augmenteront à mesure que le prix de marché du pétrole augmentera.

Exactement le même raisonnement peut être tenu pour chacun des autres combustibles fossiles, notamment pour les charbons de mauvaise qualité dont il existe des gisements considérables partout dans le monde. Ceci est également vrai des gisements de gaz naturel, dont on a repéré l'existence dans de nombreuses zones peu accessibles (par exemple dans les mers australes).

LE PRIX « ÉCOLOGIQUE » DE L'ÉNERGIE

Au niveau de prix de 40 à 50 \$ le baril, il sera économiquement rentable de produire du carburant automobile et de l'électricité à partir de nombreuses sources d'énergie renouvelables, c'est-à-dire d'énergie solaire directe et indirecte (voir liste dans le tableau n°2).

Tel sera le « prix écologique » de l'énergie.

UNE CONCLUSION OPTIMISTE

En conclusion des raisonnements qui précèdent, nous pensons que :

1. Il n'y aura probablement jamais de crise de l'énergie, sans même faire appel à l'énergie nucléaire. Les diverses techniques indirectes d'utilisation de l'énergie solaire suffiront largement.

2. Il suffira pour cela que le prix de l'énergie soit environ 2 à 3 fois le prix actuel. Il est certain que si cette augmentation de prix devait se faire brutalement au cours des 2 ou 3 prochaines décennies, elle provoquerait un conflit mondial. Mais il est vraisemblable qu'elle ne se fera que très progressivement, le prix « écologique » n'étant atteint que dans un siècle ou deux, et ne bouleversera donc pas nos modes de vie.

3. Pour autant que l'on puisse encore parler d'indices de rareté, ces indices seront infiniment grands pour tous les combustibles fossiles ainsi que pour les éléments chimiques non-radioactifs mais il ne le sera pas pour l'uranium ! Dans moins d'un siècle les réserves d'uranium seront épuisées.

LES MATIÈRES PREMIÈRES

Le bilan de l'industrie sidérurgique montre que 40 % de la production d'acier provient actuellement des carcasses d'automobile et autres ferrailles et que ce pourcentage montera à 75 % en l'an 2000. A cette époque, d'ailleurs 95 % des matériaux constituant une automobile seront recyclés.

Un autre exemple est celui des pots catalytiques : on a calculé que si tous les véhicules du monde devaient être équipés de pots catalytiques, la masse totale de platine, disponible sur terre, serait largement insuffisante. D'où la nécessité de recycler les pots catalytiques usagés... en attendant que l'on développe des moteurs qui n'en auront pas besoin. Ces deux exemples caractéristiques peuvent être généralisés et appliqués à toutes les matières premières minérales utilisées dans l'industrie, c'est-à-dire à tous les éléments chimiques de la classification périodique.

On peut lire sur le tableau 3 que, au rythme de la production minière en 1974, la longévité des réserves est infé-

Tableau 3 : Longévité (en années) des réserves et des ressources identifiées, en tonnes (sources : D. Malkin J.L. Sarbib, 1975)

| Substances minérales | Production minière 1974 | Réserves en 1974 (en tonnes) | Longévité des réserves (en années) | Ressources identifiées (en tonnes) | Longévité ressources identifiées (en années) | Augmentation des réserves en % entre 1950 et 1970 |
|---|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|---|
| Fer | 830.10 ⁶ | 2.10 ¹¹ | 240 | 2,5.10 ¹¹ | 300 | 2410 |
| Aluminium | 1,3.10 ⁶ | 3.10 ⁹ | 230 | 4.10 ⁹ | 300 | 279 |
| Cuivre | 7,5.10 ⁶ | 320.10 ⁶ | 42 | 350.10 ⁶ | 47 | 179 |
| Plomb | 3,5.10 ⁶ | 130.10 ⁶ | 37 | 150.10 ⁶ | 43 | 115 |
| Zinc | 5,7.10 ⁶ | 230.10 ⁶ | 40 | 250.10 ⁶ | 44 | 61 |
| Etain | 0,22.10 ⁶ | 10.10 ⁶ | 45 | 20.10 ⁶ | 91 | 10 |
| Chrome (30-50 %) | 6,5.10 ⁶ | 1,3.10 ⁹ | 200 | 1,5.10 ⁹ | 230 | 675 |
| Cr ₂ O ₃ | | | | | | |
| Nickel | 0,67.10 ⁶ | 80.10 ⁶ | 119 | 1.10 ⁶ | 150 | |
| Cobalt | 0,024.10 ⁶ | 4.10 ⁶ | 116 | 5.10 ⁶ | 200 | |
| Manganèse (30-50 % Mn) | 20.10 ⁶ | 4.10 ⁶ | 200 | 5.10 ⁹ | 250 | 27 |
| Molybdène | 0,06.10 ⁶ | 510 ⁶ | 83 | 6.10 ⁶ | 100 | |
| Tungstène | 0,04.10 ⁶ | 1,4.10 ⁶ | 35 | 1,5.10 ⁶ | 38 | -30 |
| Vanadium (V ₂ O ₅) | 0,011.10 ⁶ | 8.10 ⁶ | 727 | 10.10 ⁶ | 900 | |
| Antimoine | 0,072.10 ⁶ | 3.10 ⁶ | 41 | 4.10 ⁶ | 55 | |
| Bismuth | 4.10 ⁶ | 150.10 ⁶ | 37 | 200.10 ⁶ | 50 | |
| Lithium | 0,012.10 ⁶ | 2.10 ⁶ | 166 | 1.10 ⁶ | 250 | |
| Niobium (Nb ₂ O ₅) | 0,06.10 ⁶ | 10.10 ⁶ | 1666 | 15.10 ⁶ | 2500 | |
| Titane | 2.10 ⁶ | 400.10 ⁶ | 200 | 500.10 ⁶ | 250 | |
| Zirconium | 0,4.10 ⁶ | 25.10 ⁶ | 62 | 30.10 ⁶ | 75 | |
| Terres rares | 0,025.10 ⁶ | 5.10 ⁶ | 200 | 7.10 ⁶ | 280 | |
| Argent | 9,6.10 ³ | 150.10 ³ | 15 | 170.10 ³ | 18 | |
| Or | 1,5.10 ³ | 31.10 ³ | 21 | 31.10 ³ | 21 | |
| Mercure | 8,7.10 ³ | 300.10 ³ | 34 | 500.10 ³ | 57 | |
| Uranium | 0,02.10 ⁶ | 0,9.10 ⁶ | 45 | 1,5.10 ⁶ | 73 | |

rieure à 50 ans, pour onze métaux : cuivre, plomb, zinc, étain, tungstène, antimoine, bismuth, argent, or, mercure, uranium. Et la longévité des ressources identifiées n'est guère plus longue pour tous ces métaux.

On peut remarquer qu'aujourd'hui, soit 23 ans après la date de calcul de cet inventaire, nous devrions avoir déjà épuisé nos ressources en or et en argent. Et nous aurons épuisé les réserves des neuf autres métaux, au cours des deux prochaines décennies.

Il est donc raisonnable de penser qu'au siècle prochain, les matières premières de l'industrie proviendront principalement du recyclage des déchets des diverses activités humaines, et non plus des minerais naturels, dont l'extraction deviendra de plus en plus onéreuse.

Il n'y aura pratiquement plus de déchets non-utilisés.

Cette évolution sera donc guidée par des facteurs de rentabilité technico-économique... et tant mieux si, en plus, s'ajoutent des critères écologiques de non-pollution !

Il est certain que le développement, à court terme, de procédés non-polluants, sera onéreux et ne pourra se faire qu'avec subventions des pouvoirs publics. Notons toutefois que les 4 grands problèmes à résoudre (combustion propre, recyclage de tous les déchets solides, non-pollution des rejets liquides et gazeux) n'auront pas à faire appel à de nouvelles techniques. Il suffira d'exploiter les techniques existantes.

L'un des objectifs majeurs du génie des procédés, pour les 2 ou 3 prochaines décennies sera donc, à notre avis, de perfectionner ces techniques existantes et d'élargir leurs domaines d'application.

L'EXTENSION AUX PAYS EN DÉVELOPPEMENT ?

Cette conclusion semble valable pour nos pays « développés ». Mais s'applique-t-elle aux pays « en voie de développement » et surtout aux pays « sous-développés » ?

La réponse à cette question est multiple : les techniques d'anti-pollution qui vont être mises au point dans le court terme pour nos pays, pourront certainement être transposées aux pays dont le développement est déjà bien avancé. Peut-être sera-t-il nécessaire d'adapter ces techniques aux conditions locales.

Nous pouvons toutefois penser que nos enfants et petits enfants du siècle prochain seront aussi ingénieux que l'ont été leurs parents et arrière grands-parents depuis 2 siècles, et qu'ils sauront poursuivre le développement de notre civilisation technologique en inventant, encore, de nouvelles techniques garantissant une absence totale de pollution de l'environnement, dans des conditions économiquement acceptables pour la plupart des régions de la planète.

Par contre pour les pays sous-développés, cette transposition de nos techniques sera plus délicate.

Il est certain que dans ces pays à forte croissance démographique, les problèmes majeurs concerneront l'approvisionnement en eau potable, la disponibilité en terres culti-

vables, etc. L'objectif de non-pollution de l'environnement sera totalement ignoré.

On peut même prévoir qu'avec l'augmentation du prix de l'énergie et l'augmentation des prix de tous les biens de consommation qui en résultera, l'écart de développement avec nos pays ne diminuera pas, mais au contraire augmentera. Seuls parviendront à se développer les pays qui auront quelque ressource à vendre en échange de l'achat de ces biens de plus en plus onéreux.

Mais corrolairement le taux d'industrialisation de ces pays restera faible et la masse de polluants qu'ils déverseront dans l'atmosphère et dans les eaux internationales restera négligeable.

CONCLUSION

En conclusion, la transformation de nos procédés industriels actuels, pour les rendre rigoureusement non-polluants, se fera, probablement, sans difficulté technique, au cours des 2 ou 3 prochaines décennies. Dans les pays en voie de développement cette opération sera plus délicate et plus lente. Elle dépendra vraisemblablement de décisions politiques, au niveau mondial. Mais là encore, on peut affirmer que les spécialistes du génie des procédés seront en mesure d'apporter à ces décideurs politiques, les méthodes et les outils nécessaires pour atteindre l'objectif « Pollution-zéro » sur toute la planète... sous réserve que les décideurs leur en donnent les moyens.

* **Pierre le Goff et Jalel Labidi**

Laboratoire des sciences du génie chimique, CNRS - ENSIC - BP 451 - 54001 Nancy cedex

Note :

1. La première partie de ce texte intitulé « *Environnement et technico-économie des procédés industriels : la nuisance des produits* » est parue sur *Déchets, Sciences & Techniques* n° 7. 3^e trimestre 1997.

Bibliographie

Ofefp (Office fédéral suisse de l'environnement, des forêts et du paysage). Cahiers de l'environnement, n° 132 et 133. Berne octobre 91.

D. Malkin et J.L. Sarbib. *Les matières premières minérales : perspectives mondiales et politiques d'approvisionnement*. Coll : Etude de politique industrielle. Documentation Française - Paris 1975