

# Notre avenir énergétique

Autor(en): **Gardel, André**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **106 (1980)**

Heft 24

PDF erstellt am: **13.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-73997>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Notre avenir énergétique<sup>1</sup>

par André Gardel, Lausanne

## 1. Introduction

Il est certes périlleux de tenter de définir notre avenir énergétique puisque la seule certitude est celle de se tromper! La réalité de demain ne sera assurément pas celle que nous imaginons aujourd'hui, à tout le moins pas exactement. Mais des tentatives de prévision sont indispensables si l'on veut apprécier correctement les options qui se présentent maintenant. Au demeurant, rien n'empêche d'essayer de ne se tromper que le moins possible!

Cet exposé sera divisé en quatre parties, dont les trois premières concerneront la situation énergétique mondiale, et la quatrième notre pays. La Suisse ne constitue en effet qu'un modeste cas particulier à l'échelle de la planète et c'est la situation mondiale et ses problèmes qui, dans une large mesure, détermineront les conditions propres à notre pays.

Nous commencerons par récapituler brièvement quelques points généraux sur lesquels tout le monde est probablement d'accord, à des nuances près, mais points qu'il convient de rappeler car ils seront implicitement présents dans tout ce qui suivra.

Ensuite nous essayerons d'évaluer les besoins probables en énergie dans le monde et pour les décennies futures, en nous avançant, fort audacieusement peut-être, dans le 21<sup>e</sup> siècle.

En troisième lieu, nous nous demanderons comment ces besoins pourront être couverts et en dégagerons quelques faits essentiels, qui ont des implications immédiates.

Enfin, nous reviendrons à notre pays pour essayer de tirer quelques enseignements de ce qui précède.

Les questions générales dont nous avons parlé nous paraissent pouvoir se résumer en cinq points:

1. Quoique un haut niveau de vie ne soit pas une garantie de bonheur, il faut constater qu'entre un pays fortement industrialisé et un pays très peu développé l'écart est énorme, atteignant un facteur 100 quant au revenu

<sup>1</sup> Exposé présenté à l'assemblée générale de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux, Fribourg, le 25 septembre 1980.

<sup>2</sup> Plus exactement, la figure 1 fait apparaître la relation entre les Etats de divers pays à un même moment; nous montrons ailleurs qu'une même relation lie les Etats successifs d'un même pays au cours de plusieurs décennies (voir «Énergie: économie et prospective», Pergamon Press, éd. 1979).

national brut par habitant, et un facteur 1000 quant à la consommation d'énergie. En conséquence, une large majorité de la population terrestre aspire à l'amélioration des conditions matérielles de vie, et le plus souvent à une amélioration importante et rapide.

2. Il y a une corrélation étroite entre le niveau de vie et la consommation d'énergie; l'évolution est parallèle, proche d'une simple proportionnalité, ainsi qu'on le voit à la figure 1 ci-dessous.<sup>2</sup>

La consommation d'énergie d'une grande partie de la population terrestre va donc encore croître, croître beaucoup et rapidement.

3. Dans ce qui suit nous parlerons seulement d'énergie primaire, c'est-à-dire de celle que l'on tire de la nature (l'essence consommée par une voiture est comptée par la chaleur dégagée par la combustion du

pétrole utilisé et non par le travail mécanique fourni par la voiture, qui serait l'énergie utile) et bien qu'en définitive ce soit l'énergie utile qui seule nous importe. Quoique le rapport de l'énergie primaire à l'énergie utile varie selon les technologies et les définitions, la distorsion qui résulte de la seule considération de l'énergie primaire est ici sans grande importance eu égard aux incertitudes de la prévision à long terme et elle n'affectera pas les conclusions auxquelles nous aboutirons.

4. Nous ne parlerons pas de la lutte contre le gaspillage d'énergie et contre les pertes. L'opportunité de cette lutte est évidente, encore qu'il ne faille pas en attendre des miracles. Nous ne parlerons pas non plus de la nécessité d'une diminution de la dépendance à l'égard du pétrole naturel, nécessité économique et politique: il s'agit de trouver des substituts au pétrole, mais cette question ne modifie pas non plus le fond du problème que nous exposerons.
5. Il est évident que l'incertitude des prévisions croît à mesure que l'on s'éloigne dans le temps, mais on verra que les questions majeures se présenteront avant que cette incertitude ne joue un rôle exagéré.

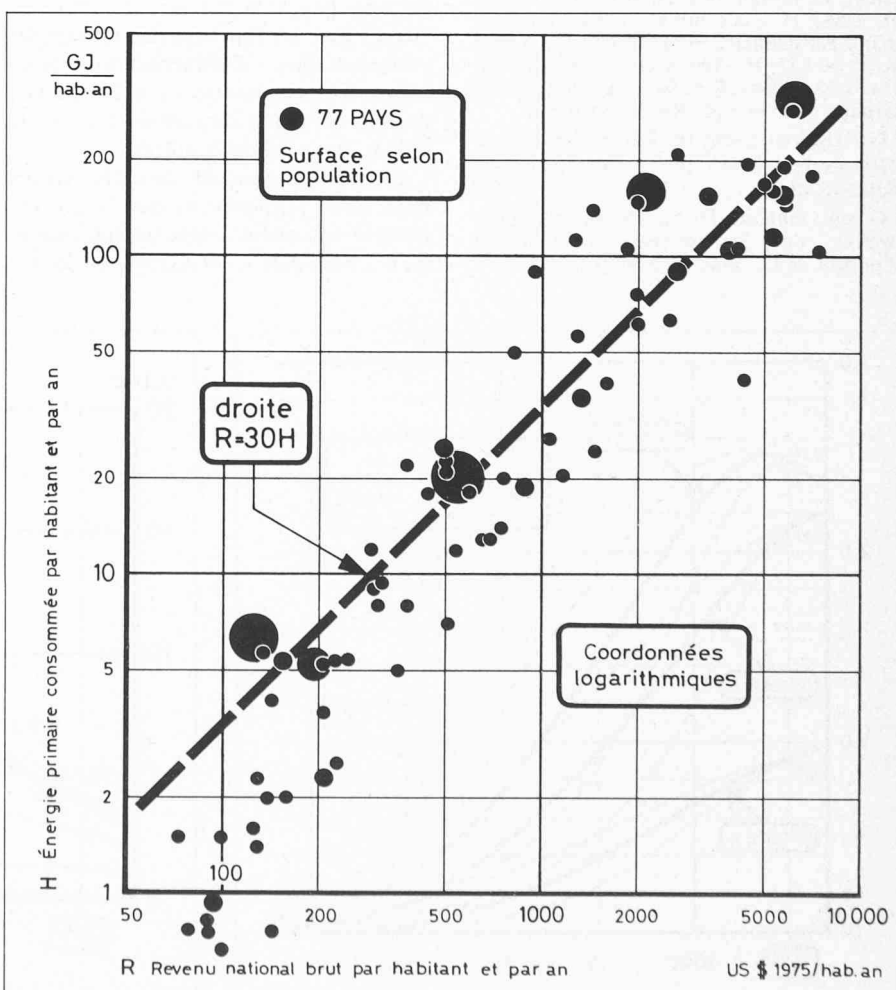


Fig. 1. — Corrélation «Revenu national brut R — Énergie primaire consommée H par habitant». (Valeurs tirées des statistiques de l'ONU pour 1975.)

## 2. Consommation mondiale d'énergie

Abordons maintenant la deuxième partie de cet exposé et tentons une prévision de la consommation mondiale d'énergie primaire dans les décennies à venir.

Nous le ferons en simplifiant apparemment beaucoup les choses, dans le souci délibéré d'éviter que «les arbres ne cachent la forêt».

Nous diviserons donc la population terrestre en trois groupes et nous évaluons pour chacun d'eux comment vont varier dans le temps son effectif, d'une part, et, d'autre part, sa consommation moyenne par habitant. Le produit des deux donne la consommation totale d'un groupe, et l'addition des trois consommations nous indiquera ce que pourrait être vraisemblablement la consommation mondiale.

Les trois groupes de populations considérés sont:

- a) *Les pays industrialisés*<sup>3</sup>: environ 1,25 milliard d'habitants.
- b) *Les pays en voie d'industrialisation*: 1,65 milliard d'habitants.
- c) *Les pays moins développés*: 1,50 milliard d'habitants,

<sup>3</sup> P: population, en G.hab. (milliards d'habitants); R: revenu national brut par habitant, en US\$. H: consommation d'énergie primaire par habitant, en GJ. En 1975: Groupe A: P = 1,15, R > 800 et H > 40; Groupe B: P = 1,50, 250 < R < 800 ou 8 < H < 40; Groupe C: P = 1,35, R < 250 et H < 8.

<sup>4</sup> GJ: gigajoules, soit 10<sup>9</sup> J ou milliards de J.

<sup>5</sup> EJ: exajoules, soit 10<sup>18</sup> J ou milliards de milliards de J.

<sup>6</sup> G.hab.: milliard d'habitants, en utilisant le préfixe du SI (système international d'unités), soit G pour giga = 10<sup>9</sup>.

soit, au total, 4,4 milliards d'habitants en 1980, consommant en moyenne 65 GJ par habitant<sup>4</sup> et pour l'ensemble 280 EJ<sup>5</sup>.

*L'évolution de l'effectif* des groupes est déterminée par les variations des taux annuels d'accroissement des populations. De très nombreux facteurs influencent ces taux, passant des changements du niveau de vie à l'impact des moyens de contraception, à la prise de conscience des problèmes posés par la surpopulation, à la volonté des gouvernements, mais dépendant aussi de la diminution de la mortalité infantile (encore élevée dans certaines régions), des progrès des conditions médicales et d'hygiène et enfin de facteurs moraux et religieux, sans parler de profondes pulsions inconscientes liées à la procréation.

C'est en nous efforçant de tenir judicieusement compte de ces diverses influences que nous avons tracé les courbes de la figure 2 ci-dessous, qui présentent l'évolution possible des taux d'accroissement. Nous l'avons fait pour trois prévisions, «pessimiste», «moyenne» et «optimiste», de manière à cerner la réalité probable et à mesurer la sensibilité des résultats aux variations des hypothèses de base.

Ces courbes sont également définies de telle sorte que la population terrestre ne dépasse pas à la fin du 21<sup>e</sup> siècle un effectif fixé en fonction des possibilités vraisemblables d'alimentation. Nous avons fixé ce maximum à 12 G.hab.<sup>6</sup> dans la prévision moyenne, et à 9 et 17 G.hab. pour les deux autres.

Ces chiffres peuvent paraître élevés, mais nous rappellerons que le gouvernement américain a récemment indiqué qu'il s'attendait à 30 G.hab. en 2100...

Notre souci est de ne pas surévaluer la demande d'énergie en surestimant les populations.

On mesurera mieux combien la prévision inférieure est optimiste si nous relevons les deux points suivants:

- a) elle prévoit 6,0 G.hab. en 2000 (alors que les experts s'accordent plutôt sur 6,3 G.hab.), ce qui implique une augmentation de 50% en 100 ans pour atteindre 9 G.hab. en 2100, alors que la précédente augmentation de 50% se sera faite en 25 ans (4,0 G.hab. en 1975);
- b) le taux d'accroissement annuel moyen des pays industrialisés, actuellement de 9‰, aura diminué à près de 1‰ en 2040, soit d'un facteur 7 en deux générations.

Comme on le voit ainsi, cette prévision optimiste est peu probable; nous dirons même très peu probable.

Si nous nous sommes quelque peu étendu sur cette prévision de l'effectif des populations, c'est que l'accroissement de la consommation mondiale d'énergie est pour moitié environ le simple fait de l'augmentation de la population terrestre.

La figure 3 ci-dessous montre ce qu'il en est de la prévision moyenne.

Venons-en maintenant à la question plus délicate de l'évolution probable de la consommation d'énergie primaire par habitant.

Là également nous partirons de trois scénarios, plus ou moins larges, des taux annuels d'accroissement, pour chacun des trois groupes de population. Ces scénarios apparaissent à la figure 4 ci-contre.

Ces taux tiennent compte d'une part des légitimes et fortes aspirations de nombreuses populations de voir leur stan-

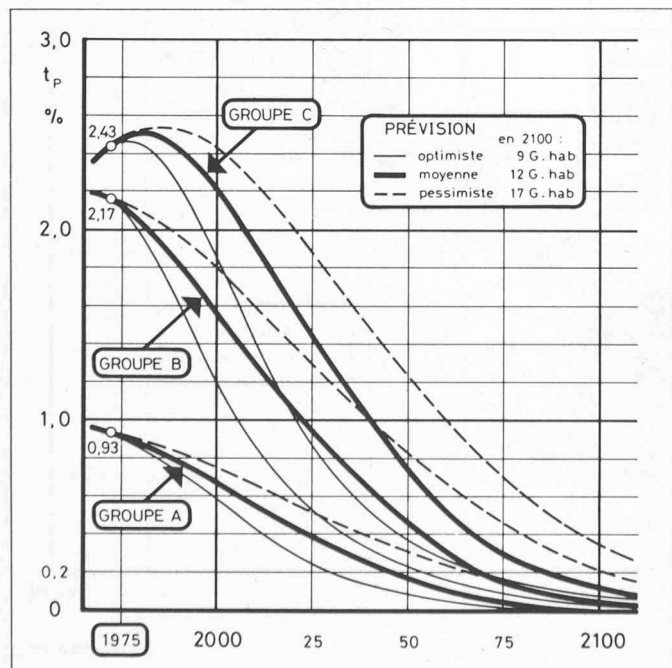


Fig. 2. — Taux d'accroissement annuel de la population (prévision moyenne 1975-2000 selon ONU).

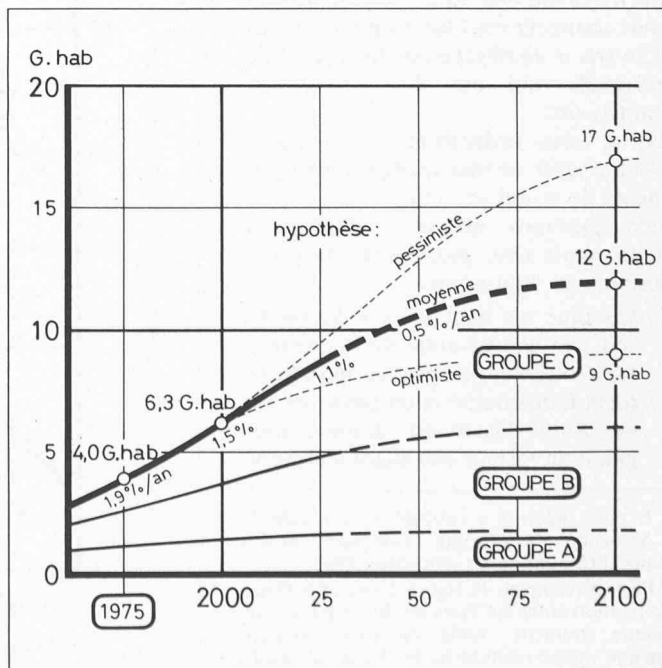


Fig. 3. — Evolution probable de la population mondiale. Hypothèse moyenne.

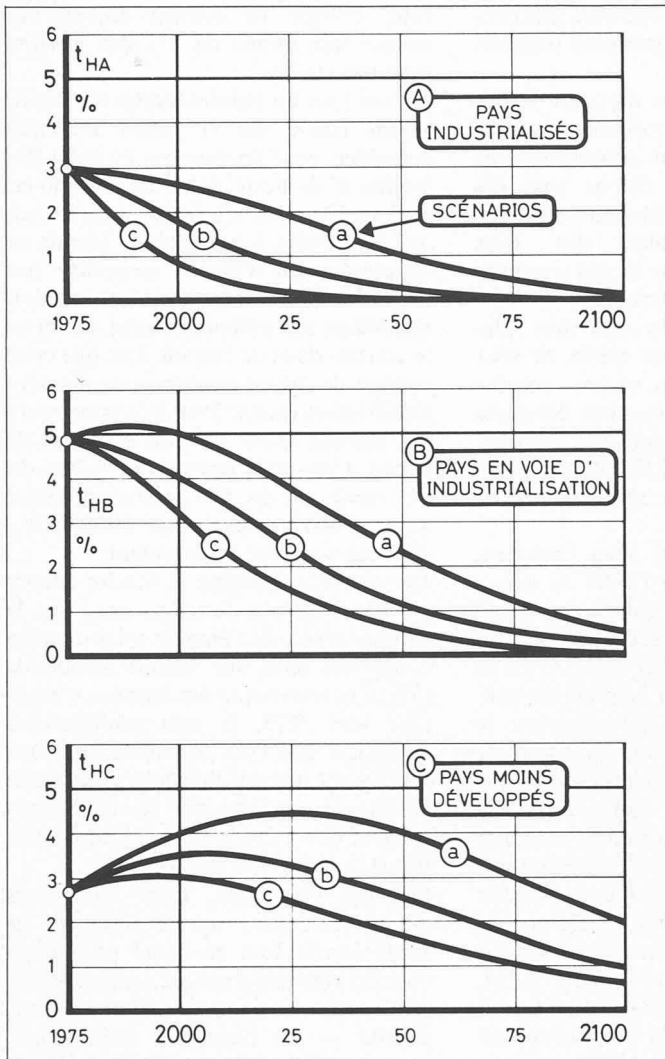


Fig. 4. — Taux d'accroissement de la consommation d'énergie primaire par habitant.

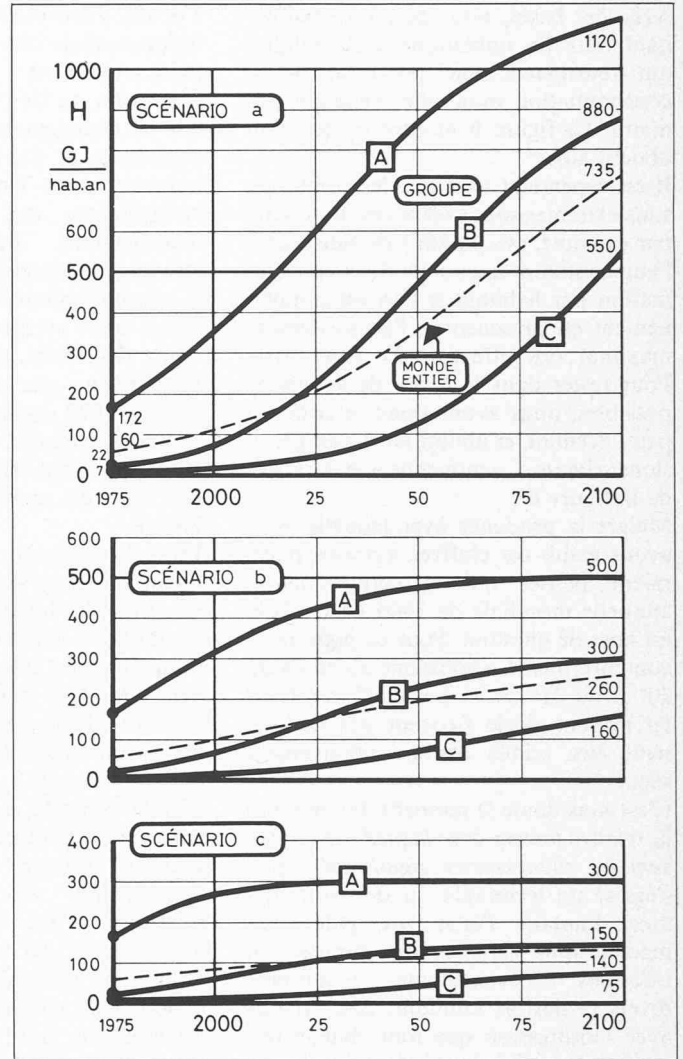


Fig. 5. — Consommation d'énergie primaire par habitant.

dard de vie s'améliorer, et également de ce que de nombreuses opérations de toutes natures sont déjà lancées qui conditionneront la consommation jusqu'à la fin du siècle, mais aussi, d'autre part, des difficultés croissantes qu'il y aura à satisfaire ces besoins, de l'augmentation progressive des investissements à mesure que les technologies deviennent plus élaborées et de l'accroissement inévitable du coût de l'énergie qui en résulte, des limitations qui proviendront de la nécessité de protéger l'environnement, sans négliger les incidences climatiques différentes dans chaque groupe.

Tout comme pour les populations, il ne suffit pas d'examiner les taux d'accroissement, il faut aussi considérer les valeurs des consommations par habitant. Elles apparaissent à la figure 5 ci-dessus.

Sans nous attarder aux commentaires que pourraient susciter ces scénarios, nous relèverons le caractère probablement excessif du scénario a, et celui, au contraire très optimiste du scénario c.

Ce dernier suppose notamment que dans les pays industrialisés la consommation par habitant, qui est actuellement de 200 GJ et atteindra 270 GJ à la

fin de ce siècle (soit 35% de plus), se stabilisera à 300 GJ, soit 11% de plus, dès le milieu du 21<sup>e</sup> siècle, c'est-à-dire à une valeur qui est déjà dépassée aux USA depuis 1968.

Il est peu probable que la somme des ambitions et des volontés des individus, des entreprises et des Etats ne conduise pas à des consommations nettement supérieures.

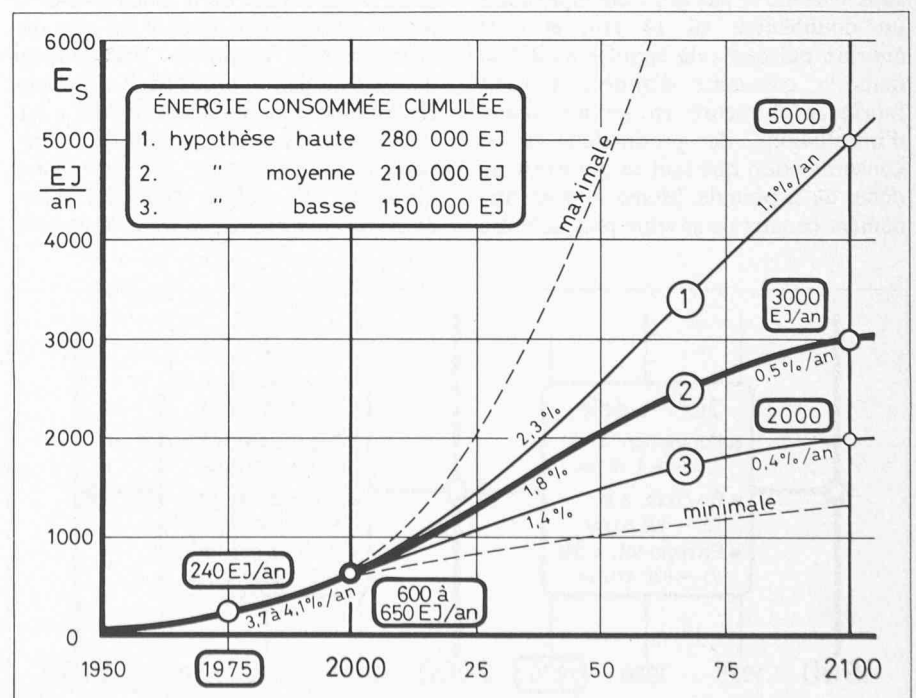


Fig. 6. — Evolution probable de la consommation mondiale d'énergie primaire.

Avec ces bases, nous pouvons maintenant faire les opérations arithmétiques qui fournissent une prévision de la consommation mondiale d'énergie primaire. La figure 6 montre ce que l'on obtient ainsi.

Il est cependant clair que les combinaisons extrêmes sont excessives. Il ne sera, par exemple, pas possible de satisfaire à l'augmentation maximale de la consommation par habitant si l'on est simultanément en présence de l'accroissement maximal des effectifs. Et vice versa. Pour rester dans le cadre de situations possibles, nous avons donc refermé un peu l'éventail, et abouti ainsi aux prévisions «haute», «moyenne» et «basse» de la figure 6.

Malgré la prudence avec laquelle nous avons établi ces chiffres, certains pourraient penser qu'une consommation annuelle mondiale de 3000 EJ en 2100 est hors de question. Pour en juger nous comparerons les évolutions au cours du 20<sup>e</sup> et du 21<sup>e</sup> siècle. Les chiffres relatifs au présent siècle peuvent dès maintenant être admis comme relativement sûrs.

C'est sans doute le moment de souligner la *relative lenteur avec laquelle se produisent les changements significatifs*, qu'il s'agisse de technique ou de comportement humain. Parce que, grâce aux médias, nous sommes très rapidement informés d'événements nombreux, divers et parfois lointains, nous vivons avec l'impression que tout change très vite. C'est parfois le cas du point de vue politique, et il est vrai que le monde évolue beaucoup et assez rapidement du point de vue économique parce que les taux annuels d'accroissement sont élevés dans beaucoup de domaines. La consommation mondiale d'énergie primaire a augmenté vers 1970 à un taux supérieur à 5% par an. Cela équivaut à un doublement en 14 ans, et c'est énorme puisque cela signifie qu'il faut dans la quinzaine d'années à venir fabriquer et mettre en service autant d'installations de production et de consommation que tout ce qui existe au début de la période. Même si momentanément ce taux ne se situe plus qu'entre

3 et 4%, il correspond encore à une évolution à venir très importante (doublement en 20 ans).

Mais cela ne doit pas masquer le fait que les changements profonds, dans les techniques et dans les comportements humains, sont lents. Or ce sont ces changements qui provoqueront des modifications durables des taux annuels, notamment en ce qui concerne la consommation d'énergie.

Dans une perspective couvrant plusieurs décennies, ou un siècle, la crise économique que nous vivons, comme celle de 1929, comme les deux dernières guerres mondiales, ne sont que des périétés qui n'ont affecté l'évolution générale que de manière momentanée et limitée.

Dans le domaine qui nous intéresse, l'*unité de temps est de l'ordre de quinze ans*. C'est la durée de vie d'un appareil ou d'une installation d'utilisation courante (voiture, téléviseur, etc.). C'est la demi-vie d'une grande centrale de production d'énergie. C'est souvent le temps qui s'écoule entre la première décision visant à la réalisation d'une grande centrale et le moment où elle entre en exploitation normale. C'est, par exemple, le temps qui a passé entre la construction du premier réacteur nucléaire (1942, Fermi, Chicago) et l'achèvement de la première centrale atomique (Shippingport aux USA, Calder Hall en Grande-Bretagne), puis de nouveau jusqu'à la commercialisation à large échelle vers 1970.

C'est aussi le temps qu'il faut pour former un bon ingénieur ou un bon ouvrier spécialisé, écoles comprises. C'est enfin la moitié de la durée d'une génération humaine.

Quinze ans, c'est le pas de temps à l'échelle des évolutions fondamentales. C'est à cette aune qu'il faut mesurer le temps qui s'écoule jusqu'à ce que des changements essentiels apparaissent dans les modes de production d'énergie. Il s'est ainsi écoulé plus de 40 ans, c'est-à-dire environ 3 de ces pas de temps, depuis la découverte de la *fission nucléaire*, et, malgré l'énorme effort dont elle a bénéficié durant la guerre,

cette énergie ne fournit aujourd'hui encore que moins de 3% des besoins mondiaux!

On sait tous les espoirs fondés sur l'utilisation future de la *fusion nucléaire* contrôlée, cette énergie qui est celle des étoiles, et de notre Soleil en particulier, et dont l'homme n'a hélas jusqu'ici tiré que la bombe à hydrogène. Même en supposant que l'on ne rencontre pas trop d'obstacles importants, on ne doit cependant pas s'attendre, ainsi que nous le verrons dans un instant, à ce que cette énergie de fusion contribue de manière significative (p. ex. 5%), à la couverture des besoins avant environ cinq pas de temps. Cela nous conduit au milieu du 21<sup>e</sup> siècle, et ces 5% correspondraient alors à 1000 centrales de 5000 MW<sub>th</sub> chacune en ordre de grandeur.

De manière analogue, il faudra encore environ trois pas de temps pour que le captage direct de l'énergie solaire puisse contribuer dans une mesure semblable (5%) à la couverture des besoins, c'est-à-dire vers 2025, et cela seulement à condition que l'on poursuive un développement intensif puisqu'à ce moment la surface couverte par les collecteurs solaires devra être de l'ordre de 20 milliards de mètres carrés!

Par ces réflexions, nous souhaitons attirer l'attention sur la nécessité de regarder très loin en avant pour chercher les chemins à suivre. La fin du présent siècle — presque demain à cette échelle — est beaucoup trop proche pour que dans l'intervalle des changements essentiels apparaissent.

On se souviendra à cet égard que les principaux consommateurs d'énergie de l'an 2000, c'est-à-dire les adultes, sont déjà presque tous nés; l'accroissement de la population entre 2000 et 2010 dépend du nombre des mères, c'est-à-dire du nombre des femmes qui existeront en l'an 2000, et celles-ci sont aussi déjà presque toutes nées.

Les grandes opérations industrielles qui conditionneront les évolutions d'aujourd'hui à la fin du siècle sont aussi dans une large mesure déjà lancées. Il faut donc clairement savoir que si l'on retarde aujourd'hui un effort de développement nécessaire, l'effet peut être fortement différé, n'apparaissant nettement que dans 10 à 20 ans.

Les changements fondamentaux sont donc d'un développement bien plus lent qu'on ne le pense souvent. Ainsi qu'on va le voir, les problèmes énergétiques essentiels pourraient bien se situer vers 2040. Ce n'est que dans quatre de ces pas de temps. L'an 2040 paraît bien lointain, et bien peu nombreux parmi nous y seront présents. Néanmoins 2040 n'est pas plus éloigné dans l'avenir que 1920 dans le passé. Or c'est vers 1920 que les réseaux téléphoniques commençaient à se développer, ainsi que la radio, et on parlait déjà de télévision; l'automobile sortait de la fabrication

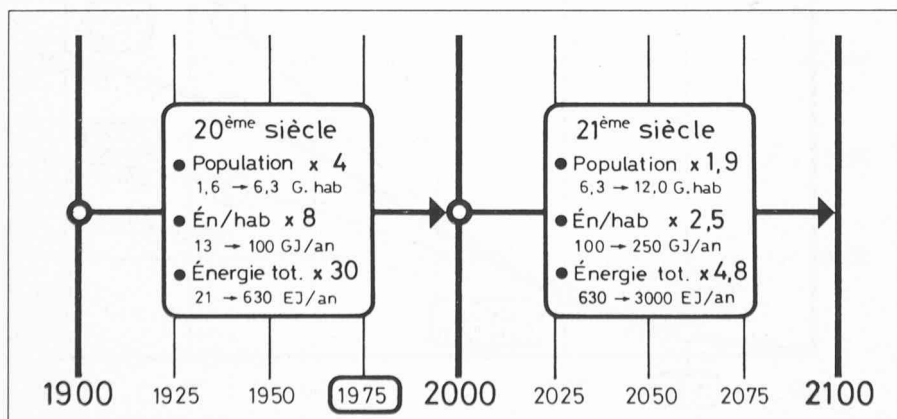


Fig. 7. — Facteurs d'accroissement en 100 ans (valeurs arrondies). Hypothèse moyenne.

artisanale et l'aviation de ligne se dessinent.

Nous avons écrit tout à l'heure que pour mieux juger du caractère réaliste des hypothèses de consommation probable d'énergie, il fallait comparer les chiffres du 20<sup>e</sup> siècle — le passé — à ceux prévus pour le 21<sup>e</sup> siècle — l'avenir. La figure 7 présente cette comparaison et permet de mesurer à quel considérable ralentissement de l'évolution correspond l'hypothèse moyenne. Il est même vraisemblable que cette hypothèse ne deviendra pas la réalité sans que l'on ait à supporter des contraintes nombreuses et marquées.

### 3. Mode de couverture des besoins

Abordons maintenant la troisième partie de cet exposé en nous demandant comment seront couverts ces besoins qui vont varier d'environ 280 EJ par an aujourd'hui à 3000 EJ en 2100, soit une énergie totale cumulée de l'ordre de 200 000 EJ.

Force est tout d'abord d'écarter de nombreuses possibilités secondaires, intéressantes en elles-mêmes et qui doivent être utilisées, mais dont la contribution ne sera que marginale dans les délais qui nous occupent. Nous pensons à l'énergie thermique des mers, à celle des marées, ou des vents, à la combustion des ordures et du fumier, aux biomasses et à l'énergie géothermique, qui, toutes ensemble, ne couvriront vraisemblablement que 1 à 2% des besoins.

On doit, hélas, en dire autant de l'énergie hydraulique.

Que peut-on attendre par contre de la fusion nucléaire, à laquelle sont consacrés les moyens importants que l'on sait?

Que la fusion contrôlée puisse être un jour une des importantes sources d'énergie n'est pas en cause ici, encore que nous soyons porté à craindre que l'on ne sous-estime actuellement les problèmes de mise au point et de sécurité qui devront être résolus. Mais la question est celle du temps que prendra ce développement.

Certes, on peut espérer produire de l'énergie de fusion dans la présente décennie. Pour qu'un rendement apparaisse, il faudra passer à des installations produisant plus d'énergie qu'elles n'en consomment. Ce sera peut-être le cas avant l'an 2000, mais, les investissements étant énormes, il s'agira tout d'abord d'énergie très chère. Peut-être de l'énergie de fusion sera-t-elle obtenue à un prix abordable vers 2010-2020. Cependant la construction et la mise en service de centaines de grandes centrales exigera dès lors plusieurs dizaines d'années. Il est ainsi quasi certain qu'au milieu du 21<sup>e</sup> siècle l'énergie de fusion ne jouera au mieux qu'un rôle encore marginal.

Dès lors, il ne reste que trois sources d'énergie primaire à l'échelle de nos préoccupations, mais dont chacune est en principe en mesure de couvrir la totalité des énormes besoins mentionnés:

1. Les combustibles fossiles (charbons, gaz, pétrole), dont les ressources sont dès aujourd'hui estimées à environ 500 000 EJ;
2. l'énergie nucléaire, mais à condition de recourir à la surgénération, ce qui met à disposition une énergie du même ordre;
3. l'énergie solaire dont on peut par exemple attendre 2000 à 3000 EJ/an si les installations de captage couvrent 0,5% des terres émergées.

Compte tenu des oppositions que suscite l'énergie nucléaire et des pollutions résultant des combustibles fossiles, il est naturel de se tourner en premier lieu vers l'énergie solaire, non polluante et renouvelable.

Comme unité de mesure, nous prendrons le mètre carré de surface collectrice, auquel s'ajoute bien entendu tout le reste de l'installation, par exemple tour-chaudière, centrale thermique, système de refroidissement, ou installation de production d'hydrogène, puis de stockage et transport, etc.

Le tableau 8 ci-dessous montre ce que pourrait être un développement très rapide du recours à cette énergie. Les taux annuels décroissent à mesure que les chiffres deviennent plus grands.

Le but est de couvrir à la fin du 21<sup>e</sup> siècle une part majeure des besoins, 2500 EJ/an sur 3000. Ce développement correspond à la fabrication et à la mise en service de plus de 1 million de m<sup>2</sup> en 1982 (ce qui paraît possible), mais 10 millions de m<sup>2</sup> en 1989 et 1 milliard de m<sup>2</sup> en 2016, etc., auxquels s'ajoutent les remplacements d'installations vieilles. C'est, on le voit, un effort gigantesque, mobilisant progressivement une part notable de la production industrielle mondiale.

Cependant, si grand soit-il, ce développement ne permet à l'énergie solaire de couvrir que la moitié des besoins cumulés de 1980 à 2100; la figure 8 montre éloquentement que l'impact reste faible jusqu'en 2050.

Dès lors, nous ne disposons pour couvrir l'essentiel des besoins au cours de la première moitié du 21<sup>e</sup> siècle que des deux autres sources: les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire.

Que peut-on attendre des combustibles fossiles? Il y en a suffisamment, mais quelle est la limite supportable de la pollution atmosphérique qu'ils engendrent? Nous laisserons de côté les questions des cendres, des oxydes de soufre et d'azote, du mercure, etc., pour ne considérer que le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> (gaz carbonique). La production en est énorme puisque tous ces combustibles sont formés principalement de carbone: 22 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> rejeté dans l'atmosphère en 1980.

Δ ans	Surface totale de collecteurs	t annuel	Accroissement moyen annuel	Énergie par an
1975	100 000 m <sup>2</sup>			0,4 PJ
5		60 %	150 000 m <sup>2</sup>	
80	1 M.m <sup>2</sup>			4 PJ
5		50 %	1200 000 m <sup>2</sup>	
85	8 M.m <sup>2</sup>			28 PJ
5		40 %	6 M.m <sup>2</sup>	
90	43 M.m <sup>2</sup>			150 PJ
5		30 %	20 M.m <sup>2</sup>	
95	160 M.m <sup>2</sup>			560 PJ
5		25 %	60 M.m <sup>2</sup>	
2000	480 M.m <sup>2</sup>			1,7 EJ
10		20 %	240 M.m <sup>2</sup>	
15		15 %	1,2 G.m <sup>2</sup>	
25	25 G.m <sup>2</sup>			85 EJ
25		~ 9 %	8 G.m <sup>2</sup>	
2050	200 G.m <sup>2</sup>			700 EJ
25		~ 3 %	10 G.m <sup>2</sup>	
75	450 G.m <sup>2</sup>			1600 EJ
25		~ 1,8 %	10 G.m <sup>2</sup>	
2100	700 G.m <sup>2</sup>			2500 EJ
Énergie cumulée 1975 - 2100 : 90 000 EJ				

Fig. 8. — Scénario d'un développement très rapide du recours à l'énergie solaire.

La moitié environ est reprise par la photosynthèse des végétaux et par dissolution dans l'eau des mers. L'autre moitié reste dans l'atmosphère dont la teneur en CO<sub>2</sub> croît lentement.

Si le CO<sub>2</sub> est transparent pour la lumière visible et laisse donc passer le rayonnement solaire, il est relativement opaque pour le rayonnement infrarouge émis par notre planète. Or, pour que la température moyenne de l'air à la surface du sol reste constante, il faut que la Terre émette en infrarouge exactement la même énergie que celle qu'elle reçoit du Soleil.

Dès lors l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> exige que la température moyenne à la surface du sol augmente, accroissant la puissance rayonnée en infrarouge par la Terre et maintenant constante l'énergie qui parvient à traverser l'atmosphère. C'est l'« effet de serre », bien connu.

Cet effet est accentué par l'augmentation parallèle de l'humidité de l'air due à la vapeur d'eau produite par la combustion des hydrocarbures. Il s'y ajoute des effets inverses, « effets de voile », dus aux poussières et à la nébulosité. L'ensemble constitue un phénomène complexe dont le détail du mécanisme est encore mal connu. Mais il semble que l'effet du CO<sub>2</sub> est prédominant, et que la température de l'air va augmenter si l'on continue de consommer des combustibles fossiles. La figure 9 montre une prévision de l'Organisation météorologique mondiale.

Or les biologistes paraissent s'accorder pour admettre qu'une élévation moyenne de 1° à 2°C serait grave, éventuellement catastrophique.

<sup>7</sup> ppm: partie par million.

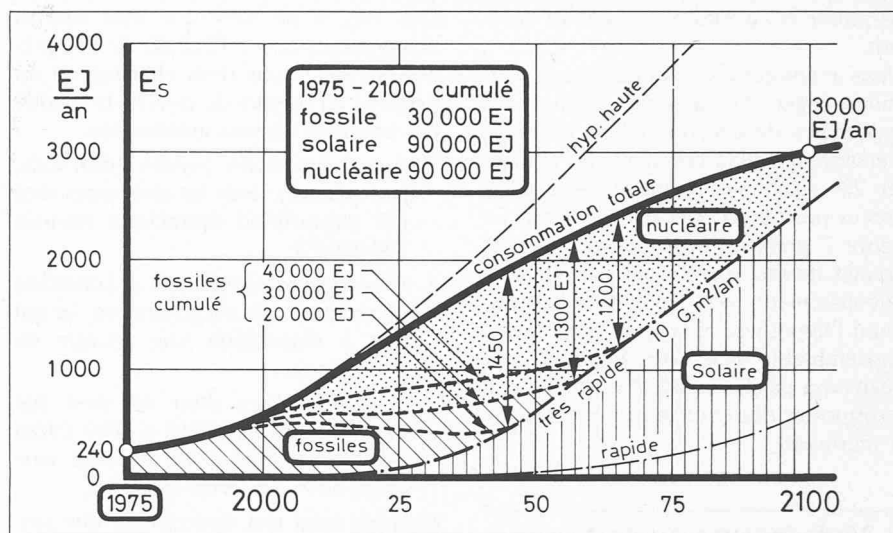


Fig. 10. — Couverture des besoins 1975-2100. Consommation; hypothèse moyenne. Solaire: développement très rapide.

Il faut ici souligner que le phénomène sera irréversible. Il n'existe aucun moyen d'aller récupérer dans l'atmosphère le CO<sub>2</sub> que l'on y a envoyé.

Il est facile de calculer que la combustion de 30 000 EJ de combustibles fossiles conduira à une teneur de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> de 500 ppm (actuellement 330)<sup>7</sup>. Elle pourrait provoquer une élévation de la température moyenne de l'air à la surface du sol de 1° à 4°C, probablement 2°C, éventuellement jusqu'à 6 à 7°C en région polaire. Dans l'état actuel des connaissances, cela constitue pour le moins un plafond à ne pas dépasser.

Or, au train où progresse la consommation des combustibles fossiles, ce plafond sera atteint vers 2030, soit dans trois pas de temps.

Comme il est impossible d'arrêter brutalement cette consommation, et qu'il

n'est même pas certain que l'on pourra se permettre d'atteindre cette consommation cumulée de 30 000 EJ, c'est dès la fin du présent siècle qu'il faudra commencer à la diminuer progressivement, de telle sorte qu'elle soit nulle ou faible (0 à 500 EJ/an) au milieu du prochain siècle.

Or dans ce délai du milieu du 21<sup>e</sup> siècle, l'énergie solaire ne sera très probablement pas en mesure de couvrir plus de 10 à 20% des énormes besoins en énergie (à condition de disposer de 100 à 200 milliards de mètres carrés de collecteurs solaires).

Il n'existe actuellement pas d'autres moyens de faire face à cette situation qu'un large recours à l'énergie nucléaire. Le diagramme de la figure 10 ci-dessus fait apparaître cette situation. Il met en évidence l'importance du recours probable au nucléaire au milieu du 21<sup>e</sup> siècle: plus de 1000 EJ/an.

On peut n'être pas partisan d'un développement nucléaire important et considérer que cela présente encore trop de risques, notamment au niveau du retraitement du combustible et du stockage des déchets.

Nous disons simplement ici que même en faisant preuve du plus large optimisme, quant aux économies possibles d'énergie, au ralentissement de la croissance des populations et du niveau de vie, au développement des solutions alternatives, il n'existe présentement pas de choix. Dans l'état actuel des techniques et des connaissances, la construction de milliers de centrales nucléaires sera inévitable dans la première moitié du 21<sup>e</sup> siècle.

La production de plus de 1000 EJ/an par voie nucléaire en 2050 correspond à plus de 10 000 centrales de la dimension de celles (au nombre de 200) que nous connaissons actuellement. C'est un chiffre qui peut, à première vue, paraître extravagant. Mais il s'agit du monde entier, et il tient compte de ce que sera vraisemblablement le niveau écono-

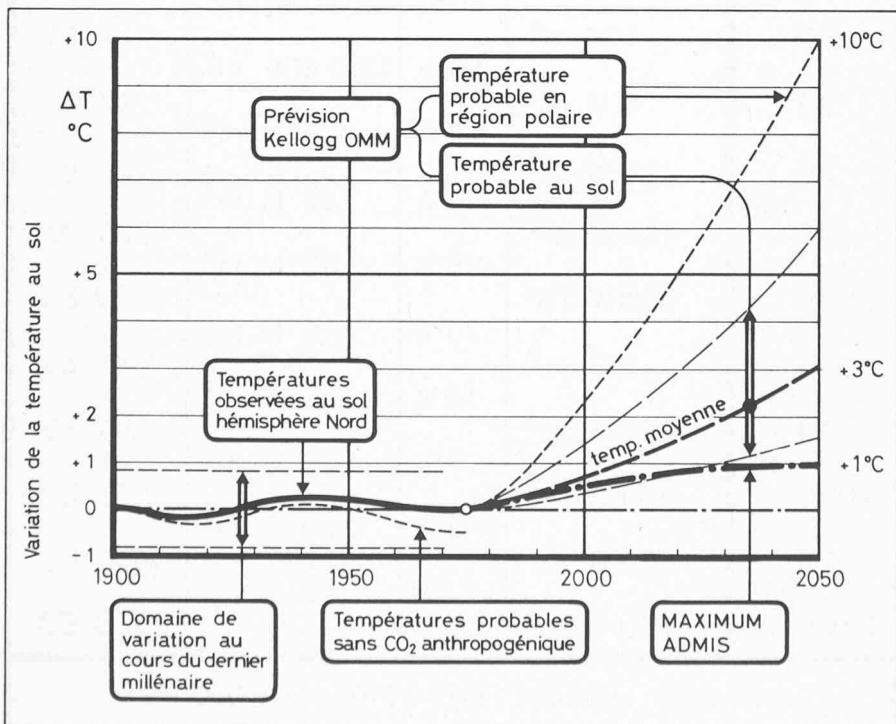


Fig. 9. — Ecart de température ΔT observés et estimés par rapport à la température moyenne actuelle à la surface de la Terre.

mique et démographique à ce moment-là. Ramené aux conditions actuelles des pays industrialisés, il correspond environ à une centrale de 1000 MW<sub>e</sub> par million d'habitants, c'est-à-dire moins du double de ce que nous connaissons déjà maintenant en Suisse, en Belgique ou en France.

Mais une observation technique importante s'impose. Ce développement nucléaire n'est possible que par un notable recours (de l'ordre de 20 à 40%) aux réacteurs dits surgénérateurs, analogues au réacteur français Super Phénix. Ces réacteurs permettent de réduire la consommation d'uranium de l'ordre de 50 fois, sans augmenter le volume des déchets. Mais ces réacteurs doivent encore être l'objet d'un perfectionnement technologique important, notamment pour réduire leur « temps de doublement » c'est-à-dire la durée pendant laquelle un semblable réacteur doit fonctionner pour fournir la charge de combustible d'un nouveau réacteur. Ce développement technologique est urgent si l'on ne veut pas aboutir vers 2020-2030 à une impasse énergétique dramatique, entraînant les conséquences économiques, puis sociales et politiques les plus graves.

Dès lors, la seule attitude raisonnable est d'accepter cette perspective nucléaire tant que d'autres faits nouveaux importants ne viennent pas modifier la situation de manière significative, et d'exiger des techniques atomiques des garanties accrues de manière à minimiser suffisamment les risques.

Mais, étant donné le temps que prennent les évolutions technologiques à cette échelle, c'est maintenant que l'effort de développement technologique des surgénérateurs doit être fait, de même d'ailleurs que doit être poursuivie la mise au point des installations solaires.

Empêcher les développements nucléaires, comme c'est actuellement le cas en Italie ou en Allemagne, c'est prendre délibérément le risque de provoquer dans une à deux générations la dramatique impasse mentionnée, privant plusieurs milliards d'habitants de la possibilité d'améliorer un niveau de vie pourtant bien insuffisant, entraînant un recours exagéré aux combustibles fossiles et une modification non moins catastrophique des conditions climatiques.

Que l'on ne croie pas que nous exagérons, que jouant les Cassandre « nous peignons le diable sur la muraille »!

L'accroissement de la population terrestre et celui des besoins par individu sont des certitudes; ce n'est que leurs valeurs qui sont matière à appréciation.

Or, même en se limitant à l'hypothèse basse, si peu réaliste qu'elle soit, les besoins en énergie au milieu du prochain siècle ne sont réduits que de 20 à

25%, ce qui ne modifie pas le fond du problème.

L'accroissement de la teneur de l'air en gaz carbonique suite à l'utilisation des combustibles fossiles (charbons, gaz ou pétrole) est une autre certitude: l'évolution en est mesurée depuis plusieurs dizaines d'années. L'effet de ce CO<sub>2</sub> sur la température de l'air est également une certitude. Ce qui est pour le moment encore mal connu, c'est l'effet des autres modifications apportées par l'homme à la composition de l'atmosphère (vapeur d'eau, poussières, etc.) et leurs influences cumulées sur le climat. Mais il n'en est pas moins certain qu'il faut être extrêmement prudent à cet égard, les modifications étant irréversibles.

Ce qui est certain aussi est que le développement du recours à l'énergie solaire, et aux autres énergies dites douces, n'aura encore que peu d'effet d'ici 2030-2050, et qu'il ne nous reste que l'énergie nucléaire.

C'est pourquoi il faut avoir le courage de constater que retarder sérieusement son progrès aujourd'hui, et tout spécialement bloquer la poursuite du développement des réacteurs surgénérateurs, serait une erreur d'une telle gravité qu'elle s'apparente à un crime contre les générations futures.

Si ensuite, dans les années à venir, des évolutions plus favorables des points de vue démographique, économique, technique ou scientifique permettent de réduire ce recours à l'énergie nucléaire, ce sera tant mieux. Mais, nous le répétons, rien ne permet aujourd'hui d'y compter. Il est hautement désirable que l'on en prenne clairement conscience.

Après ces fortes déclarations, venons-en à la *dernière partie* de cet exposé, c'est-à-dire au modeste cas particulier helvétique, modeste mais qui nous concerne très directement.

#### 4. Perspective helvétique

Rappelons tout d'abord que notre propos n'est pas de présenter les problèmes actuels de l'économie énergétique suisse, mais seulement d'évaluer quelles sont pour nous les implications des perspectives que nous avons ouvertes à l'échelle mondiale.

La première constatation est que la Suisse participera évidemment à l'évolution démographique et économique générale. Si la population n'augmentera que peu, comme prévu d'ailleurs en hypothèse moyenne, la consommation d'énergie par habitant continuera de s'accroître, notamment du fait de la vocation industrielle de notre pays, mais aussi parce que, pour des raisons diverses, notre consommation est encore relativement faible par rapport au niveau de vie. Avec une population qui ne dépasserait pas 8 millions d'habi-

tants en 2050 et une consommation par habitant qui resterait comme aujourd'hui au niveau de la moyenne des pays industrialisés (ce qui constitue des hypothèses plutôt faibles), la consommation totale d'énergie de la Suisse sera en 2050 de l'ordre de 5 fois ce qu'elle est aujourd'hui. Cela correspond à un taux moyen d'augmentation de 2 à 2,5%/an (alors qu'il était de 7% par an de 1950 à 1970).

Nos besoins sont actuellement couverts à raison, en gros, de 30% par l'hydro-électricité, de 10% par le nucléaire, et de 60% par les combustibles fossiles (et non 20% pour l'hydraulique et plus de 70% pour les combustibles comme on le dit souvent, à la suite de distorsions de calcul).

S'il reste beaucoup de petites choses à faire dans le domaine hydraulique, il ne s'agit à cette échelle que de « fonds de tiroirs » et l'hydro-électricité, même augmentée de moitié en valeur absolue verra sa part réduite à moins de 10% au milieu du prochain siècle.

L'obligation de restreindre la consommation de combustibles fossiles s'étendra de toute évidence à la Suisse aussi bien qu'aux autres Etats, et cela dès le début du siècle prochain. Il s'y ajoute la circonstance aggravante que, n'ayant pas de ressources propres en pétrole, ni en gaz ou charbons qui fournissent des combustibles de remplacement pendant quelque temps, nous serons d'autant moins libres de nos choix.

Nous avons déjà dit que l'on devrait très probablement chercher dans le captage direct de l'énergie solaire la solution du problème à long terme, c'est-à-dire pour la fin du 21<sup>e</sup> siècle. Mais à cet égard la Suisse est particulièrement mal placée, tant par sa situation géographique peu méridionale que, et surtout, par le peu de surfaces disponibles pour les installations de captage. Nous ne nous étendrons pas ici sur cette question pourtant importante, mais ne citerons qu'un fait. Si l'on voulait remplacer la production d'électricité d'une centrale nucléaire, telle que celle de Gösgen ou celle projetée à Verbois, par une installation solaire, les seuls capteurs nécessiteraient aujourd'hui une surface de 30 à 40 millions de m<sup>2</sup>. Le Valais entier, entre 1000 m et 2000 m d'altitude, n'est probablement pas suffisant pour une telle installation. Même en consacrant au captage solaire 1% de la surface du sol suisse, c'est-à-dire de l'ordre de 10 fois la surface occupée par le réseau des routes nationales, l'énergie obtenue ne couvrirait qu'environ un cinquième des besoins en 2050.

Si, à l'échelle mondiale, l'énergie solaire peut éventuellement couvrir jusqu'à 30% des besoins en 2050, ce ne pourra être le cas pour la Suisse qu'à la condition qu'il s'agisse pour une part importante d'énergie captée ailleurs, en région



subtropicale, puis transportée en Suisse, par exemple sous forme d'hydrogène. Nous laissons le lecteur réfléchir aux implications financières et politiques que cela comporte.

C'est dire que le recours à l'énergie solaire, indispensable nous le répétons, ne nous apportera qu'une aide limitée jusqu'en 2050.

Comme les autres pays industrialisés, davantage même, nous devons donc selon toute probabilité faire *un large appel à l'énergie nucléaire* (de l'ordre de 40 à 50% des besoins, fig. 11), que cela nous plaise ou non.

### 5. Conclusions

En conclusion de cet exposé, qui a laissé bien des questions dans l'ombre, nous résumerons l'essentiel en quatre points:

1. L'accroissement de la population terrestre et celui du niveau de vie, surtout dans les pays moins industrialisés, conduiront au milieu du 21<sup>e</sup> siècle à une consommation mondiale d'énergie primaire de l'ordre de 2000 EJ/an ( $\pm 500$ ).
2. Un développement extrêmement énergétique du captage solaire ne pourra assurer à cette époque que l'ordre de 500 EJ/an, peut-être seulement 100 EJ/an.
3. Pour éviter un échauffement catastrophique des basses couches de l'atmosphère, il faudra probablement réduire drastiquement l'utilisation des combustibles fossiles, à 500 EJ par an, peut-être à zéro.
4. Dans ce délai, qui n'est que de deux générations (ou 4 pas de temps), il apparaît que seule l'énergie nucléaire de fission apporte des possibilités à l'échelle du problème. Il n'y a sans doute pas lieu de s'en féliciter, mais soyons heureux qu'il existe au moins une solution. Toutefois cette voie exigera un notable recours aux réacteurs surgénérateurs.

Ces conclusions quant à la situation au milieu du 21<sup>e</sup> siècle entraînent d'autres pour l'avenir immédiat, à

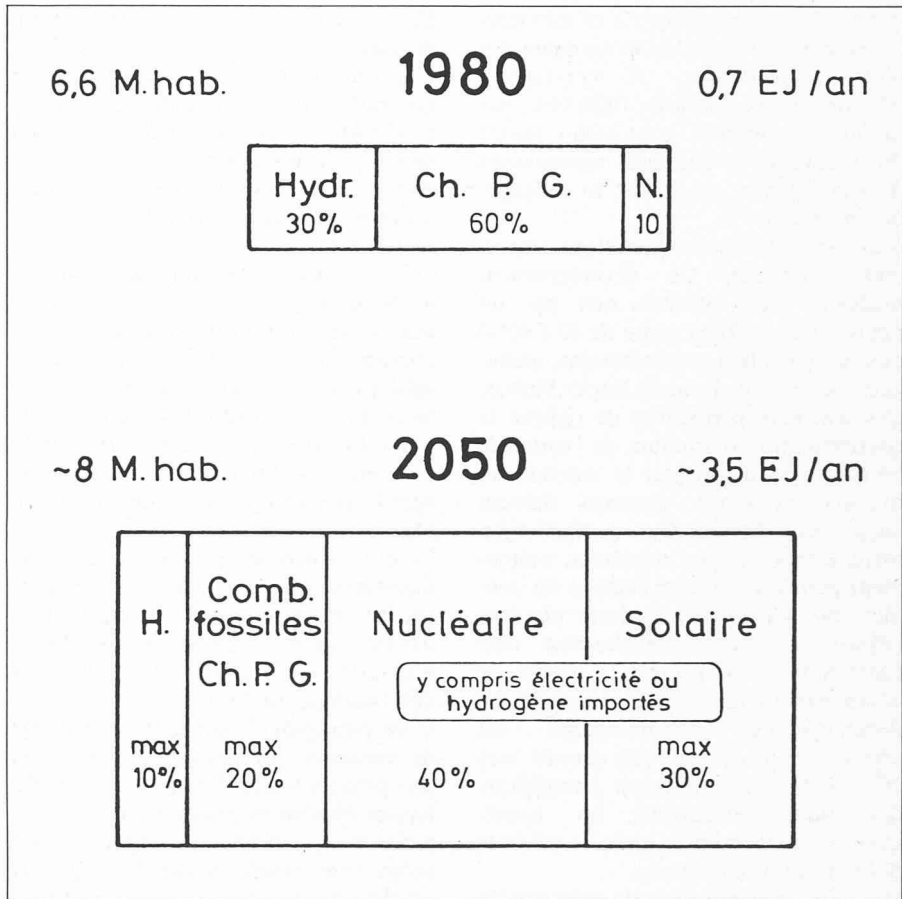


Fig. 11. — Consommation suisse d'énergie primaire.

savoir qu'il faut impérativement et avec la plus ferme volonté:

- premièrement, laisser ouverte la voie nucléaire, achever d'en maîtriser la technologie, en particulier au niveau du traitement des déchets et de leur stockage, et perfectionner notablement et rapidement les réacteurs surgénérateurs;
- deuxièmement, pousser le recours à l'énergie solaire, avec tout ce qui s'y rapporte, telle la technologie de l'hydrogène;
- troisièmement, approfondir l'étude de la physique de l'atmosphère afin de mieux cerner rapidement la question cruciale du rôle du CO<sub>2</sub>;
- par ailleurs, et comme cela a été rappelé tout au début, poursuivre sans

relâche la lutte contre le gaspillage d'énergie et contre les pertes.

Les considérations développées ci-dessus ne sont évidemment valables que s'il se maintient un équilibre général, économique et politique, ce qui exige pour le moins que l'Europe parvienne rapidement à une unité d'action suffisante. Il reste à cet égard bien du chemin à faire.

Adresse de l'auteur:

André Gardel, dr.ès.sc., professeur EPFL  
 Directeur de l'Institut d'économie et  
 d'aménagements énergétiques (IENER)  
 Ecole polytechnique fédérale, DGC  
 1015 Lausanne

## Bibliographie

### Dommages causés aux canalisations Le point de vue du juriste

par R. A. Koch. — Un vol. 15 x 21 cm, 64 pages, Editions Chantiers Montreux SA, 1979. Prix broché: Fr. 29.—  
 Le réseau des canalisations devient toujours plus long, plus dense, plus important. Par conséquent, les risques de dommage augmentent eux aussi.  
 Selon les experts, 30 câbles en canalisations souterraines sont endommagés chaque jour en

Suisse, lors de travaux de construction. Le montant des dommages se chiffre par millions.  
 Les dommages causés aux canalisations créent des situations juridiques extrêmement compliquées.  
 La présente brochure apporte un peu de clarté dans le chaos des différentes sortes de dommages et des responsabilités qui en découlent.  
 L'ouvrage, bien documenté, complet, est facile à comprendre. Il contient de nombreuses règles de conduite émanant de la pratique et n'est pas seulement destiné aux juristes, mais aussi aux maîtres de l'ouvrage, aux direc-

teurs de travaux, entrepreneurs, contremaîtres, bref à tous ceux dont les activités touchent aux canalisations.  
 Ils pourront ainsi se faire une image claire des conséquences juridiques que peut entraîner leur travail sur le terrain.  
**Sommaire**  
 Situation préalable. — La position juridique du lésé: le propriétaire de la canalisation; le tiers lésé; le dommage. — La position de l'auteur du dommage du point de vue du droit civil: la responsabilité du propriétaire foncier; la responsabilité de l'entrepreneur et des ses auxiliaires; la responsabilité de la direction

des travaux; la responsabilité du propriétaire de la canalisation et de son entrepreneur en cas de dommages causés à des canalisations appartenant à des tiers; la responsabilité du propriétaire de biens du domaine public; le dommage causé par un tiers; pluralité d'auteurs d'un même dommage. — La responsabilité du point de vue du droit pénal. — Règles de conduite: l'obligation de renseigner; l'exécution des travaux; obligations du propriétaire de la canalisation; obligations de l'auteur du dommage après l'apparition de celui-ci. — Bibliographie. — Annexes: cadastre de canalisations, photographies de dommages.