Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 77 (1986)

Heft: 20

Artikel: Réflexions sur l'avenir énergétique suisse et mondial

Autor: Gardel, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904284

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Réflexions sur l'avenir énergétique suisse et mondial

A. Gardel

Exposé présenté lors de l'Assemblée générale de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité le 5 septembre 1986 à Montreux

Au moment où ce texte est rédigé (septembre 1986), près de cinq mois se sont écoulés depuis l'accident survenu à la centrale soviétique de Tchernobyl. Dans l'esprit de certains, il s'agit d'un événement qui, par sa nature et son ampleur, bouleverse les données à partir desquelles nous devons concevoir notre avenir énergétique. C'est l'un des buts de cet exposé que d'aider le lecteur à se faire une opinion à cet égard.

Il va de soi qu'il n'est pas question ici de chercher à minimiser cet accident, incontestablement très grave, dont il faudra poursuivre l'analyse pour en tirer le plus d'enseignements possibles, pouvant déboucher sur des mesures concrètes. Mais il faut également rester attentif aux aspects fondamentaux du rôle de l'énergie dans l'économie et aux mécanismes profonds qui en gouvernent l'évolution.

Il va également de soi que ces questions doivent être abordées sans parti pris, sans aucune volonté de défendre a priori telle source d'énergie plutôt qu'une autre, sans être non plus gêné en quoi que ce soit de devoir éventuellement modifier ses opinions ou ses appréciations. Le proverbe «à nouveaux faits, nouveaux conseils» est valable ici, comme partout ailleurs.

Qu'il nous soit permis d'ajouter qu'il nous est personnellement tout à fait indifférent que l'avenir soit à l'énergie solaire ou à la fusion nucléaire plutôt qu'aux combustibles fossiles ou à la fission. Lorsque, à la fin du siècle ou dans les premières décennies du siècle prochain, la réalité viendra confirmer les réflexions qui suivent ou au contraire en faire apparaître les erreurs, personne ne nous en demandera compte car leur auteur sera depuis longtemps à la retraite ou décédé.

C'est donc avec une totale liberté que ces réflexions sont faites et ici présentées, mais non sans le souci constant d'être aussi exact que possible, en toute objectivité.

Ce préambule nous a paru nécessaire car il est connu que vers 1950–1960 nous avons cru, avec beaucoup d'autres, que l'énergie nucléaire de fission avait un avenir «radieux» par la simplicité de sa production et son bas coût. Plus tard, vers 1970–1980, mesurant mieux les problèmes que son emploi soulève, mais devenu attentif aux lourdes menaces que l'usage des combustibles fossiles fait peser sur notre environnement, nous avons pensé que la solution se trouvait dans un large recours à l'énergie solaire.

Aujourd'hui on a appris à en mesurer les limites, hélas étroites. L'âge venant (et aussi peut-être plus de sagesse!) nous espérons avoir une vue à la fois plus correcte et plus nuancée des possibilités offertes.

L'auteur de ces lignes souhaite donc que le lecteur soit assuré que ce qui suit n'est marqué par aucun désir de rester fidèle à des opinions antérieures, et de s'y cramponner au mépris des faits que la réalité nous apporte année après année.

Cet exposé est subdivisé en quatre thèmes:

- *la place de l'énergie dans le système économique,*
- *la situation énergétique probable de la Suisse à la fin du siècle,*
- *la situation mondiale vers le milieu du siècle prochain,*
- *le rôle de l'énergie nucléaire de fission après l'accident de Tchernobyl.*

Adresse de l'auteur
André Gardel, professeur à l'EPFL, ingénieur-conseil, Av. de Cour 61, 1007 Lausanne.

1. La place de l'énergie dans le système économique

Il est nécessaire d'apprécier correctement le rôle de l'énergie dans le fonctionnement de l'économie si l'on veut tenter ensuite un effort de prévision à long terme et, par voie de conséquence, en déduire l'attitude que l'on doit prendre aujourd'hui face aux problèmes que soulève l'emploi de cette énergie.

Chacun sait qu'à la fin du siècle dernier, le système économique a surtout été étudié en termes de capital et de travail, travail humain s'entend.

Puis est apparue la préoccupation des disponibilités en matières premières qui, de toute évidence, ne sont pas illimitées.

Mais ce n'est que récemment que l'importance du rôle de l'énergie, ou des énergies, dans le processus économique a été pleinement perçu. C'est la crise pétrolière de l'automne 1973 et la crainte de manquer d'énergie qui a rendu le grand public sensible au caractère omniprésent de ce rôle. Encore ne sommes-nous pas certain que chacun perçoive l'ampleur des conséquences qui pourraient résulter d'une pénurie.

Mais, nombreux sont certainement ceux qui en Suisse apprécient les avantages d'une économie prospère, offrant un niveau de vie parmi les plus élevés au monde, avec un taux de chômage particulièrement faible. Beaucoup espèrent même que ces conditions s'amélioreront encore à l'avenir.

1.1 Les désirs

Parce que nous sommes ainsi parmi les privilégiés, à l'abri de craintes aiguës pour le lendemain, nous pouvons nous permettre de nous préoccuper davantage du cadre de notre vie et plus particulièrement de la sauvegarde de la nature. Cette nature qu'il devient de plus en plus difficile de retrouver intacte et que nous voulons protéger des atteintes, souvent irrémédiables, dues aux activités humaines. Chacun pense immédiatement au problème posé par la maladie de nos forêts et à la part qui peut en être attribuée à la consommation croissante d'énergie.

L'on en vient ainsi tout naturellement à souhaiter que soit stabilisée cette consommation d'énergie, réduite même, et - pourquoi pas - fortement réduite. Mais cela bien entendu sans porter une atteinte perceptible à la prospérité économique, sans accroître le chômage, sans voir diminuer le pouvoir d'achat (dont chacun voudrait bien qu'il augmente même un peu!).

Si l'on en reste aux idées générales, comment ne pas être d'accord avec ces désirs? Et dès lors, comment s'étonner de l'audience qu'ils trouvent et du succès de ceux qui, en toute honnêteté, mais aussi parfois pour des motifs électoraux ou autres, vont déclarant qu'il n'y a qu'à le vouloir, qu'il suffit de l'imposer?

Bien entendu, il y a encore des gaspillages d'énergie qu'il faut combattre. Il y a aussi des possibilités de mieux l'utiliser, de l'économiser, notamment en améliorant des installations et des bâtiments ou en recourant à des systèmes plus élaborés. Mais beaucoup est déjà fait à cet égard, et le Suisse n'est pas porté à jeter son argent par la fenêtre; il s'est même fait une réputation internationale quant à son esprit d'économie. Nous relèverons à cet égard le fait peu connu que de tous les pays industrialisés et compte tenu du niveau de vie, c'est en Suisse que, par habitant, on consomme le moins d'énergie.

D'autre part, le souci de protéger l'environnement, s'il est plus grand aujourd'hui, n'est pas nouveau. Il serait bon que sur ce point les aînés ne se culpabilisent pas exagérément. Il y a aussi dans toute cette thématique une part de mode, une sorte de querelle des anciens et des modernes dont les fondements ne sont pas tous objectifs.

1.2 Les faits

Quoi qu'il en soit de ces remarques générales, si l'on en vient aux faits, que constate-t-on?

Tout d'abord que la comparaison chiffrée de la situation de tous les pays du monde montre qu'en gros, la consommation d'énergie est simplement proportionnelle au niveau de vie (fig. 1).

Si l'on compare, par exemple, deux grands pays tels que l'Inde et les USA, en 1980, le produit intérieur brut (PIB) par habitant est 47 fois plus élevé aux USA et la consommation d'énergie 54 fois plus grande. Si, plus près de nous, on compare la République fédérale d'Allemagne et la Grèce, le PIB par habitant est 3,2 fois plus élevé dans la première et la consommation d'énergie 2,7 fois. Il y a évidemment quelques exceptions, d'ailleurs significatives, telle la Chine populaire dont le PIB est proportionnellement beaucoup trop faible, ou l'Arabie Saoudite où il est très élevé, ou l'ensemble des pays de l'Europe de l'Est, URSS comprise, dont le PIB par habitant est 3 fois plus faible que celui de l'Europe de l'Ouest à énergie consommée égale. La Suisse est remarquable en ce sens qu'on y consomme 2 fois moins d'énergie par habitant à niveau de vie égal.

L'examen de l'évolution des situations dans le temps fait également apparaître que dans les pays industrialisés, la consommation d'énergie croît en même temps que le niveau de vie, quasi proportionnellement en période d'expansion économique (comme on le voit sur la figure 2 pour la période 1965-1973)[1]. D'autres graphiques analogues pourraient être présentés. La Suisse cependant fait exception, puisque jusqu'en 1973 la consommation d'énergie y croissait avec le carré du PIB. Mais après un recul du PIB de 1974 à 1976, sans diminution de la consommation d'énergie, on se retrouve aujourd'hui sur la loi initiale.

Il semble donc bien que l'on doive considérer comme établi le fait que dans le monde entier et dans le temps, il y a en gros proportionnalité entre le niveau de vie et la consommation d'énergie.

Or, c'est bien là le point central de la controverse. A la question: peut-on réduire la consommation sans abaisser le niveau de vie - avec le cortège de problèmes économiques et sociaux que cela entraîne -, il faut admettre que la réponse est négative: personne n'y parvient même si cela peut être possible temporairement ou occasionnellement.

Et, à y regarder de plus près, cela ne devrait pas nous surprendre. Il suffit de réfléchir à ce qu'implique une augmentation du PIB par habitant pour s'apercevoir que cela entraîne automatiquement un semblable accroissement des besoins en énergie, qu'il s'agisse de locaux plus vastes (à construire, et chauffer), de machines et installations plus puissantes ou plus performantes, d'automation ou de robotisation accrues, de l'usage fait par chacun d'un pouvoir d'achat plus élevé, etc.

[1] «Electricité valorisée»: multipliée par 2,5 pour tenir compte de ce qu'il faut 2,5 GJ de combustibles fossiles pour produire 1 GJ d'électricité (le rôle de l'électricité est ainsi systématiquement sous-estimé dans les statistiques).

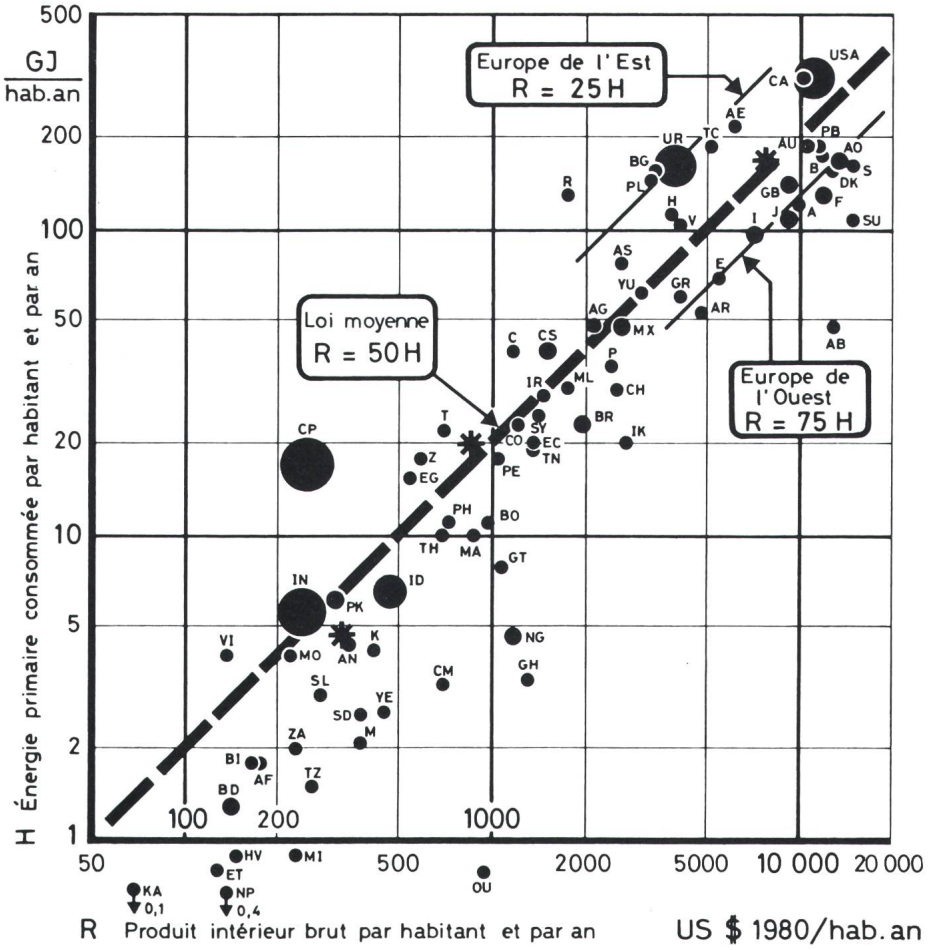


Fig. 1 Corrélation «Produit intérieur brut R – Energie primaire consommée H par habitant»

AF	Afghanistan	CO	Colombie	J	Japon	SD	Soudan
AS	Afrique du Sud	CS	Corée du Sud	K	Kenya	SL	Sri Lanka
AG	Algérie	C	Cuba	KA	Kampuchéa	S	Suède
AO	Allemagne Ouest	DK	Danemark	M	Madagascar	SU	Suisse
AE	Allemagne Est	EG	Egypte	ML	Malaisie	SY	Syrie
AN	Angola	EC	Equateur	MI	Mali	TZ	Tanzanie
AB	Arabie Saoudite	E	Espagne	MA	Maroc	TC	Tchécoslovaquie
AR	Argentine	ET	Ethiopie	MX	Mexique	TH	Thaïlande
AU	Australie	USA	Etats-Unis	MO	Mozambique	TN	Tunisie
A	Autriche	F	France	NP	Népal	T	Turquie
B	Belgique	GH	Ghana	NG	Nigeria	UR	URSS
BD	Bangladesh	GR	Grèce	OU	Ouganda	V	Venezuela
BI	Birmanie	GT	Guatemala	PK	Pakistan	VI	Viet-nam
BO	Bolivie	HV	Haute-Volta	PB	Pays-Bas	YU	Yougoslavie
BR	Brésil	H	Hongrie	PE	Pérou	YE	Yemen Nord
BG	Bulgarie	IN	Inde	PH	Philippines	Z	Zimbabwe
CM	Cameroun	ID	Indonésie	PL	Pologne	ZA	Zaïre
CA	Canada	IR	Iran	P	Portugal		
CH	Chili	IK	Iraq	R	Roumanie		
CP	Chine populaire	I	Italie	GB	Royaume-Uni		

Le sentiment différent que l'on peut avoir dans un premier temps semble dû au fait que l'on peut toujours perfectionner un système énergétique quelconque pour en abaisser la consommation sans en diminuer les performances. Mais ce disant, on perd de vue l'énergie dépensée à étudier, fabriquer et mettre en place ces perfectionnements; on perd aussi de vue que cela exige des investissements qu'il faut au préalable gagner ailleurs par une production accrue, elle-même consommatrice d'énergie; on perd enfin de vue que le perfectionnement prévu va générer des profits que l'on ne peut pas utiliser sans déclencher ailleurs une augmentation de la consommation.

Nous comprenons parfaitement que l'on puisse souhaiter qu'il en soit autrement. Mais «les faits sont têtus», et il faut bien s'incliner devant eux en fin de compte.

1.3 La croissance

Pour en terminer avec le souci de situer correctement la place de l'énergie dans le système économique, il nous faut encore nous demander comment ce système va évoluer à l'avenir, plus précisément, une expansion est-elle probable ou va-t-on vers une stabilisation prochaine? La réponse à cette question nous est nécessaire pour évaluer ce que pourront être les besoins futurs en énergie, que ce soit pour la Suisse ou à l'échelle mondiale.

A l'échelle mondiale, la première cause de croissance de la consommation d'énergie est l'amélioration du niveau de vie des populations les plus défavorisées. Si le milliard d'habitants des pays les plus industrialisés consomment en moyenne près de 200 GJ[2] par habitant et par an, il existe un autre milliard d'habitants, celui des pays les moins développés, dont la consommation annuelle est inférieure à 5 GJ par an, soit 40 fois plus faible[3].

Ainsi, des 5 milliards d'habitants que la Terre comptera à la fin de 1987, 4 milliards pour le moins aspirent à une rapide amélioration des conditions matérielles dans lesquelles ils vivent.

Mais même au sein du milliard le plus favorisé, les disparités sont grandes d'un pays à l'autre ou d'une région à l'autre. Nous pourrions aller jusqu'à dire que la majorité des individus s'efforce d'améliorer sa situation matérielle et qu'il en est de même de la plupart des collectivités publiques et de la quasi-totalité des entreprises.

Au surplus, les pays industrialisés se doivent de chercher à améliorer la situation des moins développés, tant pour des raisons politiques, voire éthiques, que pour des motifs simplement commerciaux. Comment s'étonner dès lors que la consommation globale d'énergie croisse?

A ces considérations socio-économiques, il faut en ajouter une autre, qui pèse d'un poids encore plus lourd

[2] GJ: gigajoule; les unités utilisées sont précisées plus loin au paragraphe 2.

[3] En 1980, 21 pays totalisant 995 M.hab. ont consommé 188,1 EJ, soit 189 GJ/hab. 19 autres pays, totalisant 1007 M.hab. ont consommé 4,28 EJ, soit 4,25 GJ/hab. (M.hab. = million d'habitants; EJ, GJ: voir définition paragr. 2)

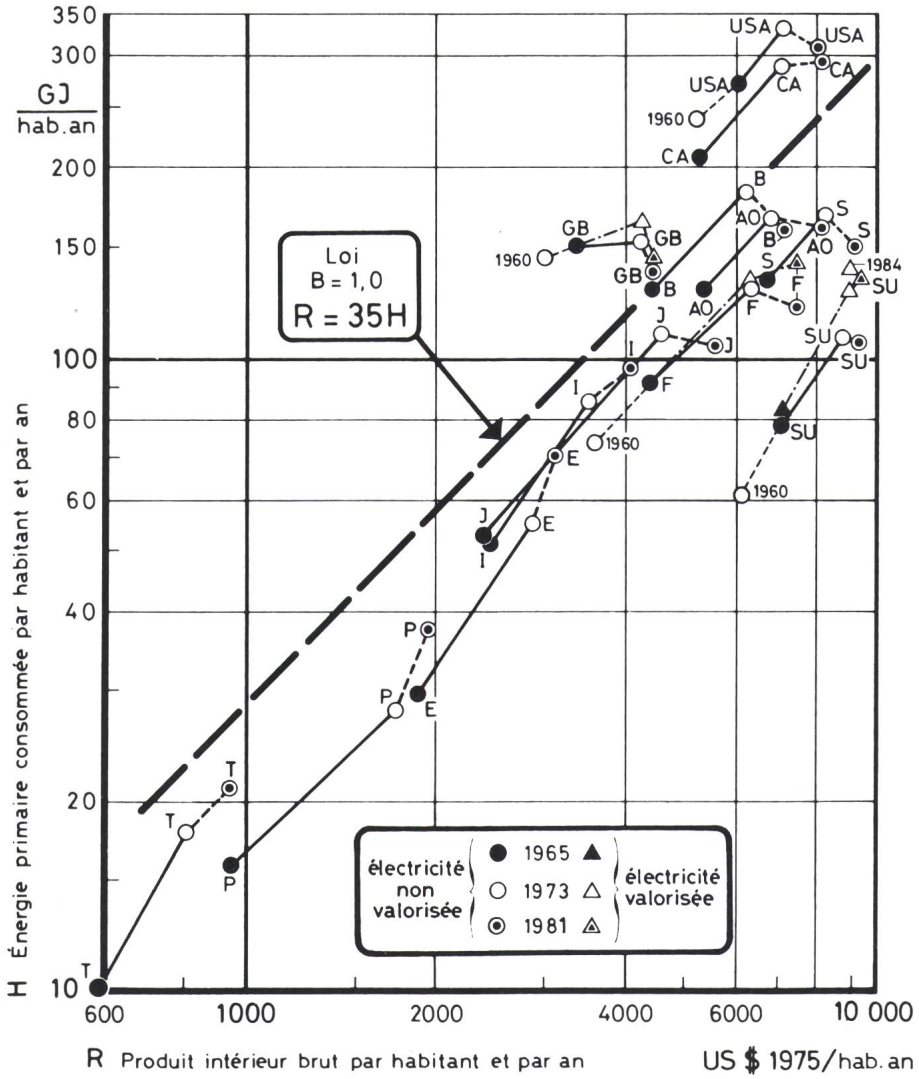


Fig. 2 Corrélation «Produit intérieur brut – Energie primaire consommée par habitant»
Evolution 1965–1973; 1973–1981

que les précédentes. Il s'agit de l'évolution démographique.

Les consommations d'énergie mentionnées jusqu'ici, qui sont liées au standard de vie, sont des consommations par habitant. Or, le nombre des habitants continue de croître. Il augmente au rythme mondial moyen de 1,7% par an pour la période 1980–1982[4], tandis que la consommation d'énergie par habitant paraît n'avoir augmenté que de 1% par an ces 10 dernières années.

Sans doute peut-on supposer que cette croissance de la population mondiale va se ralentir. De nombreux pays, et notamment l'immense Chine populaire, font de réels efforts dans ce sens, conscients qu'ils sont du lourd fardeau que leur impose la croissance démographique. Mais dans combien d'autres pays ne voit-on pas l'inquiétude inverse et la volonté de maintenir ou accroître le poids politique et économique grâce à une population plus nombreuse? On prend alors des mesures pour favoriser les grandes familles, alors que les Chinois font l'inverse!

Quoi qu'il en soit des dispositions administratives, la procréation obéit à un besoin fondamental et s'intègre dans un contexte religieux et traditionnel sur lequel il est difficile d'agir. En outre, les populations n'augmentent pas seulement du fait des naissances, mais aussi grâce à la diminution du nombre des morts (l'espérance de vie à la naissance a passé en Chine de 40 ans à plus de 60 ans en peu d'années). Beaucoup des plus grands pays ont ainsi des taux annuels de croissance démographique de plus de 2%.

1.4 Premières conclusions

Dès lors, et pour résumer ce premier thème, constatons que:

- l'amélioration du standard de vie entraîne un accroissement, en gros proportionnel, de la consommation d'énergie par habitant.
- des disparités considérables existent entre pays industrialisés et pays moins développés, disparités dont la diminution, nécessaire, implique un accroissement des besoins en énergie.
- la quasi-totalité des individus, des entreprises et des collectivités publiques ont tous et toutes une même ambition de progrès matériel qui entraîne l'augmentation de cette consommation.
- enfin, et surtout, la croissance démographique est un facteur essentiel de cette augmentation des besoins en énergie.

On peut regretter qu'il en soit ainsi, on le doit peut-être, mais il ne sert à rien de prendre ses désirs pour des réalités. Cette augmentation des besoins en énergie va se poursuivre pendant de nombreuses décennies encore; souhaitons que ce soit à des taux annuels décroissants.

2. L'évolution probable en Suisse jusqu'en l'an 2000

Si les considérations qui précèdent sont relativement développées, c'est qu'elles sont essentielles pour le troisième thème, l'évolution à l'échelle mondiale au cours des premières décennies du prochain siècle. Elles n'en fournissent pas moins des éléments d'appréciation pour ce qui concerne l'évolution en Suisse au cours des prochaines années.

2.1 Méthodologie

Pour évaluer ce que pourra être la consommation suisse d'énergie d'ici l'an 2000, nous pouvons nous baser sur le développement possible du produit intérieur brut et chercher à connaître sa relation avec les besoins énergétiques. Nous pouvons aussi estimer ce que pourrait être l'évolution des diverses énergies utilisées, considérées séparément. On disposera ainsi d'un recoupement des chiffres, même si les causes économiques profondes

[4] 1,74%, dernier chiffre connu; ce taux ne varie pas rapidement: il était le même, 1,74%, pour la période 1975–1980.

sont les mêmes dans les deux cas. C'est ce qui va être fait ci-après. Nous pourrons alors nous interroger sur la manière dont il sera possible de faire face à ces besoins.

Auparavant, il convient de préciser qu'à l'échelle mondiale les consommations sont établies en énergie primaire, soit celle qui est tirée de l'environnement (pouvoir calorifique des combustibles, énergie hydraulique, etc.). A l'échelle de la Suisse, on dispose de chiffres plus précis, soit ceux déterminés en énergie distribuée. C'est celle qui est vendue aux usagers, donc comptabilisée, et que les vendeurs appellent «énergie finale» (Endenergie). Nous préférons la désigner par «énergie distribuée» car elle n'est finale que pour les vendeurs, elle serait plutôt «initiale» pour les acheteurs!

2.2 Unités

Chacun sait que diverses unités peuvent être utilisées pour mesurer une énergie. Nous n'emploierons que le joule (ou ses multiples), qui est l'unité du système international (SI), au demeurant seule unité légale dans la plupart des pays[5].

Rappelons, à toutes fins utiles, que

1 joule = 1 J = 1 watt pendant 1 seconde[6] = 1 newton (force) se déplaçant de 1 mètre.

En outre:

10^9 J = 1 gigajoule = 1 GJ
10^{15} J = 1 petajoule = 1 PJ
(penta = 5; 1 PJ = 1000^5 J)
10^{18} J = 1 exajoule = 1 EJ
(hexa = 6; 1 EJ = 1000^6 J)

2.3 Produit intérieur brut

Cela dit, revenons à la Suisse et à l'évolution de son économie. La figure 3 montre ce qu'il en a été du PIB total, en francs courants, dès 1965. On ne peut manquer d'être frappé par la régularité de la progression, mise à part la période dite de «surchauffe» de 1969 à 1974, puis de «récession» et de «reprise» de 1974 à 1979. Dès cette dernière date, la progression s'inscrit bien dans le prolongement de la période précédant 1969.

[5] Le tep, ou tonne d'équivalent pétrole, cher à nos voisins français, vaut 44 milliards de joules (44 GJ) et n'est utilisé que pour sensibiliser l'opinion à la dépendance à l'égard du pétrole; il n'a pas sa place ici.

[6] Ainsi 1 kWh = 3 600 000 J = 3,6 MJ; 1 milliard de kWh = 3,6 PJ.

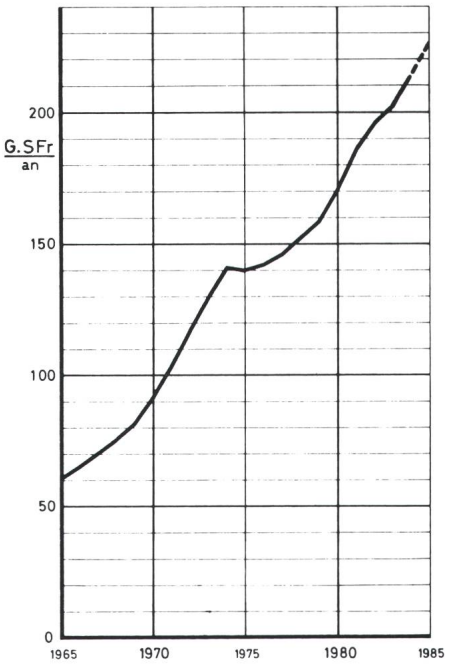


Fig. 3 Produit intérieur brut suisse par an en francs suisses courants

Mais cette présentation en francs courants masque l'effet de l'inflation, ainsi que celui des variations de la population. En rapportant le PIB au nombre des habitants et en le calculant en francs constants, on obtient la figure 4[7].

[7] On n'oubliera cependant pas que ce calcul fait intervenir l'indice des prix à la consommation, indice qui n'est qu'une estimation non exempte d'appréciation; à preuve le fait que son mode de calcul est périodiquement révisé et qu'il a même comporté en son temps une mémorable erreur (provenant des fruits et légumes) qui a induit plusieurs milliards de sursalaires!

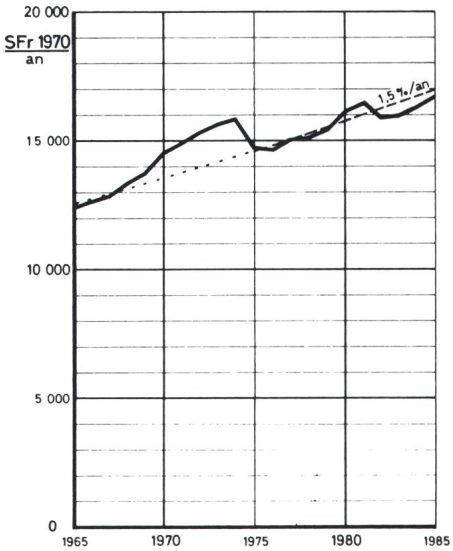


Fig. 4 Produit intérieur brut suisse par habitant et par an en francs suisses 1970

Il en ressort que le taux de croissance moyen se situe à 1,5% par an. Ce taux paraît convenir pour de longues durées puisqu'il couvre aussi bien la période «surchauffe - récession - reprise» de 1969 à 1979 que celle plus récente «récession - reprise» de 1981 à 1984, consécutive au deuxième choc pétrolier. Nous ne pensons pas qu'il faille être délibérément pessimiste quant à l'avenir et admettre un taux inférieur pour la prochaine décennie, ... ni délibérement optimiste et un taux supérieur.

Pour les 15 ans séparant *1985 de 2000,* on peut ainsi s'attendre à un *accroissement du PIB par habitant de 25%,* en francs constants.

Il nous faut maintenant déterminer quelle variation de la consommation d'énergie peut être induite par cet accroissement du PIB.

2.4 Consommation d'énergie

La figure 5 fait apparaître ce qu'il en a été de 1960 à 1985. On y constate que

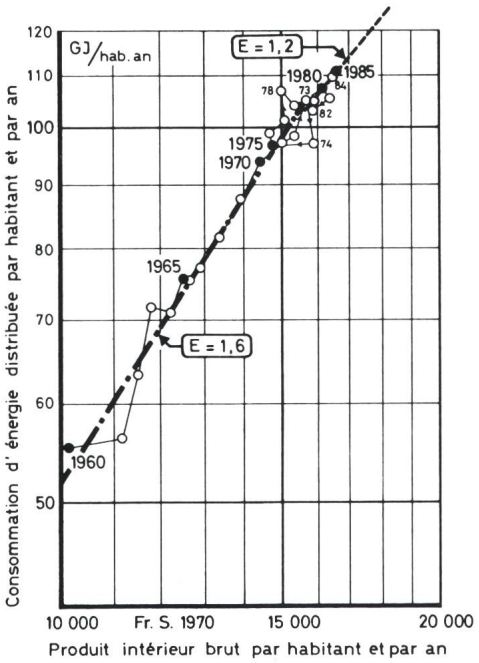


Fig. 5 Corrélation PIB-Energie distribuée, cas de la Suisse

de 1960 à 1973, la relation entre PIB et consommation d'énergie peut être représentée par une droite de pente 1,6. Les échelles de la figure étant logarithmiques, cela signifie que, durant cette période, la consommation d'énergie a augmenté avec la puissance 1,6 du PIB ou, autrement dit, qu'un accroisse-

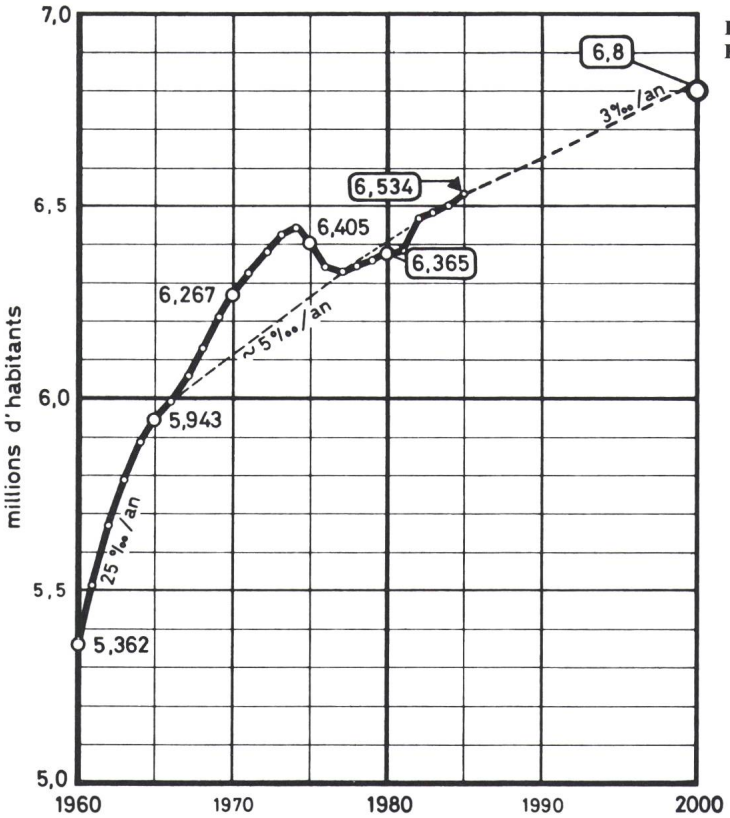


Fig. 6
Population de la Suisse

ment du PIB de 10% a entraîné une augmentation de consommation de 16%, donc sensiblement plus élevée qu'une simple proportionnalité.

La progression de la consommation d'énergie paraît en moyenne avoir été moins forte par rapport au PIB, dès 1975, et une pente de 1,2 semble pouvoir être adoptée (quoique le point de 1985 ne soit pas très éloigné de la droite antérieure de pente 1,6[8].

Nous adopterons cet exposant de 1,2 pour la prévision de 1985 à 2000, ce qui conduit, avec l'accroissement de 25% du PIB déjà établi, à une *augmentation de la consommation d'énergie distribuée par habitant de 31%*[9].

Il reste à tenir compte d'une éventuelle variation du nombre des habitants. La figure 6 indique ce qu'il en a été à ce sujet dès 1960. Après la diminution de 1974 à 1977, consécutive aux limitations imposées à l'entrée d'étrangers, on voit que la population suisse a repris une lente croissance; il s'est agi ces dernières années de 0,3% par an. En supposant le maintien de ce faible taux annuel jusqu'en l'an 2000, il s'agirait d'une *augmentation de la population de 5%*.

L'énergie distribuée totale s'accroîtrait donc de 37% de 1985 à 2000[10].

En 1985, cette énergie distribuée a atteint 724 PJ, répartis comme indiqué sur la figure 7. *La consommation probable pour l'an 2000 s'établit ainsi à 990 PJ par an.*

Nous disposons ainsi d'une première évaluation de la consommation à la fin du siècle.

Comme nous l'avons annoncé plus haut, nous allons chercher un recoupement de ce chiffre de 990 PJ/an en considérant séparément l'évolution probable de chacune des énergies distribuées: combustibles, carburants et électricité.

2.4.1 Combustibles

La figure 8 fait apparaître ce qu'il en a été de la consommation de combustibles de 1950 à 1985. Après avoir progressé de 4 à 7% par an en haute

[8] On prendra garde que dans cette représentation, la rapidité de la croissance du PIB ou de la consommation d'énergie n'apparaît que par la vitesse avec laquelle la droite est parcourue, c'est-à-dire par l'écartement des points.

[9] $[(1+1{,}5\%)^{15\,\text{ans}}]^{1,2} = [(1{,}015)^{15}]^{1,2}$
$= (1{,}250)^{1,2} = 1{,}307$

[10] $1{,}307 \times (1{,}003)^{15} = 1{,}367$

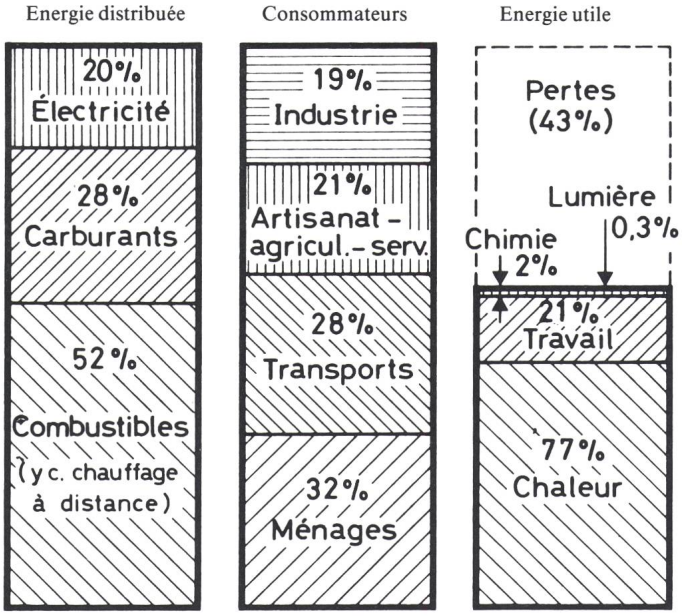


Fig. 7 Consommation d'énergie en Suisse
Energie distribuée (= vendue) au consommateur 1985: 724 PJ
PJ pétajoule = 1 million de milliards de joules (1 joule ≅ 100 grammes tombant de 1 mètre)

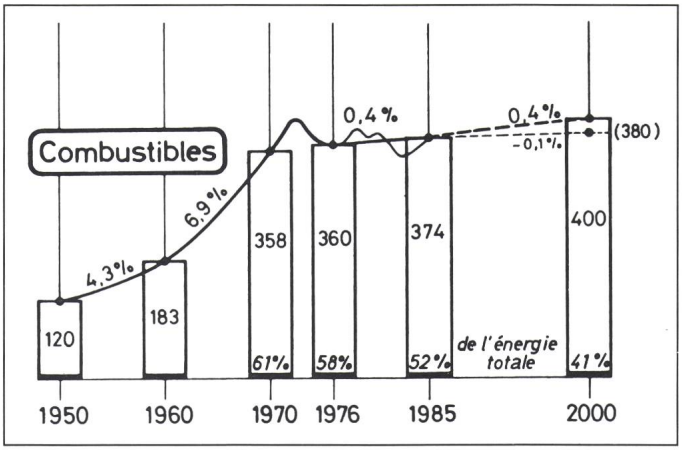


Fig. 8 Energie distribuée en Suisse
PJ/an

conjoncture, cette consommation n'a que peu augmenté dès 1976, de 0,4% par an en moyenne. C'est évidemment et pour une large part l'effet des nombreuses et diverses mesures d'économie qui ont été prises, aussi bien par suite du souci de limiter la pollution de l'air que plus simplement en conséquence de l'élévation du prix des combustibles, mais c'est aussi l'effet de la substitution de l'électricité aux combustibles pour certains usages.

On peut penser que cette volonté d'économie et de protection de l'air continuera à se manifester d'ici à la fin du siècle, limitant ainsi l'effet de l'accroissement progressif du volume des constructions à chauffer. Le maintien d'un taux d'augmentation de 0,4% par an conduirait en l'an 2000 à une consommation de *combustibles de 400 PJ/an*.

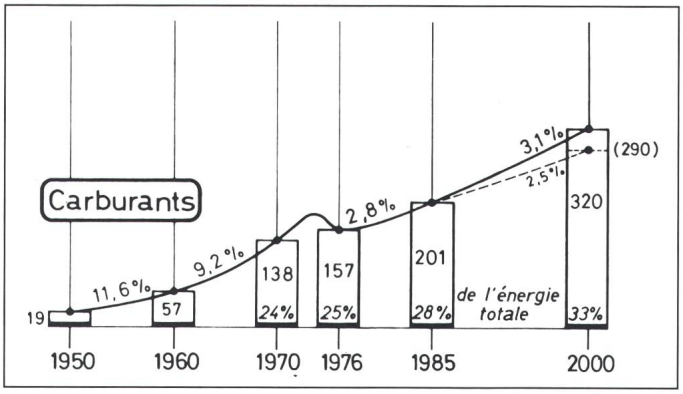
Ainsi, les combustibles (dans lesquels nous incluons pour simplifier le volume limité de la chaleur distribuée par réseau de chauffage à distance: 9 PJ en 1985) verront s'abaisser à 41% leur part du total des énergies distribuées, part qui s'élevait à 58% en 1976.

Il est évidemment tentant d'espérer une plus forte volonté de protection de l'air, pouvant conduire à une consommation plus faible en l'an 2000. On ne perdra cependant pas de vue que beaucoup de mesures d'économie sont déjà prises et que ce sont surtout les plus faciles à mettre en œuvre et les moins onéreuses. Il n'est pas évident que l'on fera l'effort, année après année, d'introduire de nouvelles mesures, de plus en plus coûteuses[11]. Le bas niveau actuel du prix des produits pétroliers agit même momentanément en sens inverse.

Néanmoins, on peut imaginer une quasi-stagnation de la consommation, suite à une forte hausse du prix des combustibles ou pour toute autre cause, et considérer que l'utilisation des *combustibles* ne dépassera pas *380 PJ/an* en l'an 2000. Cela revient en fait à une diminution moyenne de 0,1 à 0,5% par an compte tenu d'un accroissement possible de la chaleur distribuée, qui passerait de 9 PJ/an à 20 ou 40 (comme indiqué plus loin).

[11] Par exemple, s'il est aisé d'abaisser de 22 °C à 20 °C la température de locaux, on ne peut évidemment pas continuer à l'abaisser de 2 °C tous les 2 ou 3 ans!

Fig. 9
Energie distribuée en Suisse
PJ/an



2.4.2 Carburants

L'évolution de la consommation en carburants apparaît sur la figure 9. On y voit que l'augmentation de 9 à 11% par an en haute conjoncture a fait place à une progression plus modérée dès 1976, de l'ordre de 3% par an.

On sait que le nombre des véhicules en circulation continue de croître de manière importante et assez régulière; contrairement à des prédictions maintes fois répétées, il n'apparaît pas encore de signe net de saturation. Cela ne signifie cependant pas que le nombre des conducteurs croisse proportionnellement!

L'extension du réseau des routes nationales, si elle conduit à une meilleure utilisation des véhicules, entraîne un accroissement des kilomètres parcourus et des vitesses, donc des consommations. On doit bien constater que malgré la diminution de la consommation spécifique (l/100 km) des véhicules, le volume des carburants utilisés progresse constamment.

Il nous semble que pour les 15 années à venir, on doit s'attendre à la poursuite de cette évolution: diminution de la consommation spécifique[12] et augmentation des kilomètres parcourus. Le taux annuel, de 2,8% an entre 1976 et 1985, pourrait ainsi se situer entre 2,5 et 3% par an entre 1985 et 2000. La consommation en *carburants* s'établirait alors entre *290 et 320 PJ/an* à la fin du siècle.

[12] En moyenne, pour l'ensemble du parc automobile suisse, dont le renouvellement exige une dizaine d'années.

2.4.3 Electricité

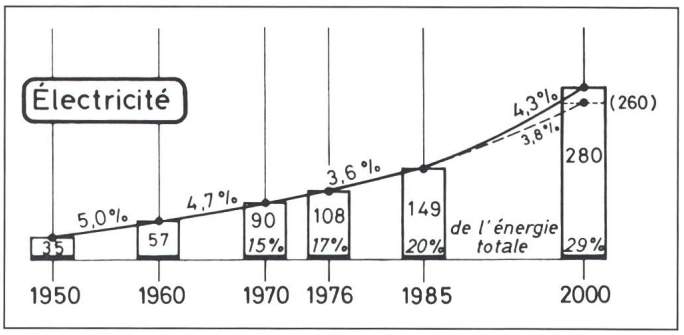
Reste l'électricité, dont la consommation n'a cessé de croître même en période de récession, ainsi que cela ressort de la figure 10, et cela à un taux annuel qui n'a que peu varié:

5% par an en haute conjoncture
3% par an de 1970 à 1976
4% par an ces trois dernières années.

La régularité de cette progression s'explique notamment par le fait, déjà noté, que si le prix des combustibles monte, l'électricité est utilisée en substitution; mais si le prix du pétrole baisse, il en résulte une relance de l'économie qui induit à son tour un accroissement de la consommation d'électricité. Il s'y ajoute que la part de l'électricité augmente au fur et à mesure que le degré d'industrialisation croît. Le souci de protection de l'environnement conduit aussi à préférer l'électricité aux combustibles là où c'est possible, et ce souci s'accentue.

Nous pensons donc qu'il faut s'attendre à voir progresser la consommation d'*électricité* à un taux voisin de 4% par an, ce qui conduit en 2000 à *260 PJ/an* si le taux moyen est de 3,8% et 280 PJ/an si ce taux est de 4,3%.

Fig. 10
Energie distribuée en Suisse
PJ/an



2.4.4 Consommation totale

Il est dès lors possible de totaliser ces trois consommations, ce qui conduit à environ *970 PJ/an d'énergie distribuée à la fin du siècle* (en additionnant la moyenne des «fourchettes» relatives à chaque composant).

Ce total diffère peu de l'évaluation précédente de 990 PJ/an.

On peut ainsi tenir pour probable que cette consommation d'énergie distribuée sera en Suisse voisine de 980 PJ/an, ±20 (évtl. ±50), en l'an 2000.

Il n'est pas inutile de souligner que si ce chiffre d'environ 1000 PJ pour l'an 2000 peut paraître élevé, il ne correspond cependant qu'à un accroissement moyen de 2% par an, assez modeste. Cela signifie aussi que si la consommation de l'an 2000 est de 20 ou 40 PJ inférieure, le total indiqué sera atteint en 2001 ou en 2002, ce qui ne fait pas grande différence pour nous.

2.5 Couverture des besoins

La consommation probable étant ainsi estimée, nous devons nous demander *comment il sera possible d'y faire face.*

2.5.1 Couverture des besoins en combustibles

Nous commencerons par les combustibles et admettrons que va se maintenir une ferme volonté de réduire la dépendance à l'égard du pétrole, mais aussi à l'égard du gaz naturel et du charbon, tous combustibles importés.

On connaît le souci de certains milieux que l'on recoure au maximum à des énergies renouvelables. Encore faudrait-il parfois mieux distinguer entre celles[13] qui polluent l'atmosphère tout autant que les combustibles fossiles et celles que l'on peut de ce point de vue qualifier de «douces» (solaire, géothermie, hydraulique). Il faudrait aussi tenir compte des autres atteintes à l'environnement (p.ex. surfaces occupées par les installations solaires). Il faudrait enfin se préoccuper des coûts relatifs de ces énergies, des investissements qu'elles peuvent exiger, de la fiabilité des installations, etc.

Pour simplifier, nous nous bornerons ici à estimer ce que ces énergies, parfois qualifiées de «nouvelles», peuvent apporter au maximum en remplacement d'autres combustibles et d'ici à l'an 2000.

Les forêts suisses fournissent actuellement environ 1 million de tonnes par an de *bois de feu,* soit 11 PJ. Il a été estimé que l'exploitation complète de la totalité des forêts du pays pourrait apporter un maximum de 40 PJ. Compte tenu de la difficulté à atteindre ce niveau d'exploitation, du temps nécessaire pour mettre en place les installations d'utilisation, de la moins grande commodité et du coût, nous admettrons que cette source d'énergie pourrait doubler son apport au cours des 15 prochaines années et fournir *20 PJ/an.*

La combustion des *ordures et déchets* a apporté 6 PJ en 1985. Il a été estimé qu'il pourrait en l'an 2000 s'agir de 2 millions de tonnes, incinérables dans la proportion des trois-quarts, avec un pouvoir calorifique moyen de 13 MJ/kg, équivalant à 20 PJ/an. Pour des raisons semblables à celles évoquées pour le bois, nous admettrons que l'on pourrait atteindre la moitié de ce chiffre, soit *10 PJ/an.*

L'exploitation énergétique du *fumier* n'en est qu'à ses débuts et l'énergie dégagée n'a pas atteint 1 PJ en 1985. Il est néanmoins possible d'estimer ce que pourrait être au maximum l'apport du fumier de la totalité du cheptel suisse, soit 25 PJ/an. En admettant que l'on en tire *10 PJ/an* en l'an 2000, nous sommes probablement très optimiste.

Les estimations faites de ce que l'*énergie géothermique* pourrait apporter varient dans les plus larges limites, allant de moins de 1 PJ/an à l'ordre de 10 PJ/an. Cet apport est aujourd'hui encore insignifiant en Suisse. Admettons que cet apport pourrait atteindre *5 PJ/an* à la fin du siècle.

Il reste à examiner ce que peut fournir le captage direct de l'*énergie solaire.* Nombreux sont ceux qui croient pouvoir fonder de grands espoirs sur cette forme d'énergie, qui est en apparence abondante, gratuite et non polluante. Un grand nombre de petites installations fonctionnent dès à présent, mais leur apport total semble encore bien inférieur à 1 PJ/an.

Déterminé à faire la plus grande place à cette énergie, nous imaginerons ici que l'on pourrait en l'an 2000 avoir fabriqué et mis en service des installations dont les capteurs couvriraient 10 millions de m². C'est à peu près la surface d'une autoroute allant de Genève à Romanshorn et il pourrait en coûter l'ordre de 5 milliards de francs. La chaleur ainsi recueillie s'élèverait à *15 PJ/an*[14]. Il ne faut cependant pas oublier que cette chaleur est mal répartie dans le temps et que l'on ne dispose pas encore de moyen de la stocker à grande échelle à des conditions acceptables.

Quoiqu'il semble bien qu'à l'heure actuelle il n'existe pas une confiance suffisante dans la fiabilité de ces installations et que l'on ne soit pas prêt à y affecter d'aussi grandes surfaces, qu'enfin le coût de cette énergie est élevé, nous retiendrons ce chiffre de 15 PJ/an.

Nous trouvons ainsi un total de *60 PJ/an pour ces diverses sources de chaleur, indigènes et renouvelables* (fig. 11). Atteindre ce chiffre en l'an 2000 suppose une volonté affirmée qui ne paraît pas encore exister aujourd'hui, et ce total est sans doute trop optimiste. Parvenir à la moitié sera déjà un remarquable succès.

Quoi qu'il en soit, 60 PJ/an ne constituent que les 15% des 380 à 400 PJ nécessaires.

La couverture des 85% restants ne paraît pouvoir être obtenue qu'à l'aide des combustibles fossiles ou de chaleur distribuée à distance.

Il est clair que séparer le *chauffage à distance* des combustibles fossiles n'a de sens que si ce chauffage a une autre source que ces combustibles. Ainsi, cette source ne peut être que de la chaleur soutirée aux centrales nucléaires (sur la partie à basse température, 100 à 150 °C, du circuit de vapeur).

Ce chauffage à distance a fourni 9 PJ/an ces dernières années, nous l'avons vu. Porter son apport à *20 à 40 PJ/an* d'ici à l'an 2000 exige un important effort de développement des infrastructures de distribution de cette chaleur. (Ce supplément de 10 à 30 PJ/an réduira un peu l'électricité produite par ces centrales, ce dont il conviendra de tenir compte par ailleurs.)

Ainsi, les *combustibles fossiles* devront-ils à la fin du siècle fournir encore au moins *300 PJ par an.*

[13] Bois, fumier, ordures, etc.

[14] $10 \cdot 10^6$ m² de sol permettent d'installer $3 \cdot 10^6$ m² de capteurs (à cause des ombres portées), qui recueillent environ 5 GJ/m²·an en moyenne (selon altitude et orientation), donc 15 PJ/an. Il semble bien que l'on mesure mal dans le public combien faible est la densité spatiale de l'énergie solaire et combien élevés sont nos besoins.

	Année :	1976	1983	1984	1985	2000
1	Bois	8	11	11	11	max 20
	Ordures et déchets	—	5	6	6	max 10
	Fumier	—	—	—	—	max 10
	Géothermie	—	—	—	—	max 5
	Solaire	—	—	—	—	max 15
2	Chauffage à distance	—	9	9	9	20 à 40
3	Gaz naturel	23	44	51	53	80 à 100
	Charbon	9	15	20	20	30 à 50
	Total 1+2+3	40	84	97	99	200 à 240
4	Produits pétroliers	320	271	274	274	160 à 180
	TOTAL	360	355	371	373	380 à 400

Fig. 11
Combustibles et chaleur distribués
PJ/an

Soucieux de limiter la part des produits pétroliers, on peut imaginer de voir continuer à progresser celle du *gaz naturel*. Ainsi qu'on le voit sur la figure 11, elle a passé de 23 à 53 PJ/an de 1976 à 1985. Il semble donc qu'elle pourrait s'accroître encore de 30 à 50 PJ et atteindre ainsi *80 à 100 PJ/an* à la fin du siècle.

Il est plus difficile d'apprécier correctement ce qu'il pourrait en être du *charbon*. Son apport a doublé de 1976 à 1984, passant de 9 à 20 PJ/an. S'il est aisé à stocker, son emploi est moins commode que celui des hydrocarbures et l'utilisation des cendres n'est pas toujours facile. Admettons cependant un nouvel accroissement de 10 à 30 PJ/an, sa part atteindrait ainsi *30 à 50 PJ/an en l'an 2000*[15].

Avec ces hypothèses, il resterait *160 à 180 PJ/an* à couvrir par les *produits pétroliers*, soit en gros 100 PJ de moins qu'aujourd'hui (274 PJ en 1984 et 1985).

Il ressort de cet examen de la couverture en l'an 2000 des besoins probables de la Suisse en combustibles que l'apport des énergies renouvelables sera limité (15% au maximum, éventuellement 10% seulement, actuellement 4%) et qu'une notable diminution du recours aux produits pétroliers n'est pas exclue. Au surplus, la consommation en combustibles ne devant probablement augmenter que peu ou pas, on ne doit pas s'attendre à d'importants problèmes d'approvisionnement.

[15] 40 PJ/an correspondent à environ 1,5 millions de tonnes par an, pouvant produire 200 000 m^3 de cendres.

2.5.2 Couverture des besoins en carburants

Dans le délai de 15 ans qui nous sépare de la fin du siècle, nous ne pensons pas que la propulsion des véhicules va se trouver modifiée par l'apparition d'un nombre appréciable d'engins électriques ou solaires. Les études en cours, quoique relativement nombreuses, sont encore loin de permettre d'escompter des changements significatifs. Force est donc d'admettre que le besoin en carburants (290 à 320 PJ en 2000) restera couvert en quasi-totalité par des produits pétroliers.

Il s'agit donc à ce titre d'un accroissement d'une centaine de PJ/an (1985: 201 PJ) qui compensera approximativement la diminution du recours à ces mêmes produits pétroliers pour le chauffage.

Ainsi, et à moins qu'on ne refasse une place importante aux hydrocarbures pour la production d'électricité – ce dont nous parlerons plus loin –, le recours total (combustibles et carburants) aux produits pétroliers pourrait être de 460 à 490 PJ/an (160 à 180 pour les combustibles, 290 à 320 pour les carburants). Il a été de 475 PJ en 1985. *Nous ne pensons donc pas que l'on doive s'attendre à une diminution des importations suisses de produits pétroliers d'ici à l'an 2000.* Il pourrait même s'agir d'une augmentation, dans la mesure où les parts prises par le gaz et le charbon, et surtout par les énergies renouvelables, n'atteindraient pas les chiffres admis plus haut ou si les produits pétroliers devaient concourir à la production d'électricité.

2.5.3 Couverture des besoins en électricité

Nous pouvons aborder maintenant le troisième et dernier composant de l'énergie distribuée: l'électricité. Cela nous conduira inévitablement à évoquer la place que pourrait prendre l'énergie nucléaire, question délicate au sujet de laquelle l'opinion publique est particulièrement sensible. C'est dire que cet examen doit être fait avec une attention particulière, et cela d'autant plus que le bon fonctionnement de notre économie est étroitement lié à un approvisionnement en électricité qui soit suffisant, sûr et aussi avantageux que possible.

La consommation probable en l'an 2000 ayant été estimée de 260 à 280 PJ/an, cherchons comment on pourra couvrir la valeur moyenne de *270 PJ/an*.

La situation actuelle est indiquée pour 1983 et 1985 aux colonnes 1 et 2 de la figure 12. On y observe tout d'abord la part majeure assurée par la production hydraulique, nettement dépendante cependant des conditions climatiques. La part nucléaire a notablement progressé de 1983 à 1985 par la mise en service de la centrale de Leibstadt. La part thermique est faible et varie peu.

Ce tableau montre que de 1983 à 1985, les besoins ont augmenté de 11 PJ (150–161), tandis que la production hydraulique diminuait de 13 PJ (126–113). A première vue, ce manque de 24 PJ au total est exactement compensé par l'accroissement de 23 PJ de la production nucléaire. Mais c'est oublier que les centrales nucléaires fonctionnent principalement à puissance constante et qu'ainsi une part de la production de Leibstadt a lieu à des heures où il n'y pas preneur en Suisse et doit être exportée. Les exportations ont même progressé au-delà, de 14 PJ, tant du fait des modifications de la répartition dans le temps de la production hydraulique que de circonstances du marché. Ainsi, les importations ont-elles été nettement plus élevées, passant de 40 à 56 PJ.

Cette brève analyse nous fournit une base pour imaginer divers scénarios de couverture des besoins en l'an 2000. C'est l'objet des colonnes 3 à 5 de la figure 12.

2.5.4 Scénario «nucléaire»

Dans un premier scénario, que l'on pourrait qualifier de «nucléaire», nous imaginerons que les choix sont faits en

	1	2	3	4	5
PJ d'électr.	1983 humide	1985 légt. hum.	2000 hydraulicité moyenne		
			(1) nucl.	(2) écol.	(3) médian
Production					
Hydraulique	126	113	130	120	130
Nucléaire	53	76	190	80	135
Thermique	4	3	5	20	30
P. indigène	183	192	325	220	295
Importation	40	56	45	120	60
TOTAL	223	248	370	340	355
Utilisation					
Distribué	137	149	270	270	270
Pertes	13	12	15	15	15
Consommé	150	161	285	285	285
Exporté	73	87	85	55	70
TOTAL	223	248	370	340	355

Fig. 12
Electricité (en PJ): bilans suisses possibles

donnant la priorité aux préoccupations suivantes:
- exploiter au maximum le potentiel hydraulique indigène,
- limiter strictement la dépendance à l'égard de l'étranger en stabilisant les importations,
- contribuer à la protection de l'air en n'augmentant pas la production thermique.

Ces priorités imposent d'accroître notablement le recours aux centrales nucléaires, mais en améliorant cependant les conditions d'utilisation du courant qu'elles produisent. Pour cela, il faut développer les installations de pompage-turbinage permettant de stocker une partie des excédents de production au lieu de les exporter.

Ce premier scénario fait l'objet de la colonne 3 de la figure 12. Dans la figure, tous les chiffres ont été arrondis à 5 PJ près pour souligner leur caractère approximatif.

Nous avons d'autre part admis qu'il s'agissait en l'an 2000 d'une année d'hydraulicité moyenne et non pas nettement humide, comme 1983 par exemple. Il va de soi que le système de production doit néanmoins pouvoir faire face aux variations de l'hydraulicité; il peut s'agir de 10 à 15 PJ de plus (ou de moins) pour lesquels des réserves doivent exister soit dans la capacité des installations suisses, soit au niveau des importations.

Il est connu que l'achèvement de la mise en valeur du potentiel hydraulique national, y compris les modernisations envisageables, ne permettra guère de pousser la production au-delà de 130 PJ/an (36 TWh). Dès lors, en ajoutant environ 15 PJ de pertes de transport (chiffre à peine supérieur aux pertes actuelles) et en limitant les exportations à 85 PJ, donc au niveau de 1985, il faudra disposer de 370 PJ.

En fixant à 45 PJ le volume des importations et en maintenant à 5 PJ la production thermique, c'est à 190 PJ que doit s'élever la production nucléaire. Cela impose la construction et la mise en service de 4 nouvelles centrales de 1000 à 1200 MWe dans les 15 ans à venir[16].

Il va de soi qu'un tel programme supposerait une acceptation du nucléaire par la population, qui ne paraît pas être réalisée aujourd'hui, notamment en conséquence de l'accident de Tchernobyl.

Compte tenu du délai d'une dizaine d'années entre la mise en train d'un projet et l'entrée en service complète d'une centrale, on peut douter que l'opinion évolue dans une mesure telle que ce programme soit encore réalisable dans ce délai.

Nous pensons qu'il faut le regretter, étant donné ses avantages économiques, politiques et écologiques; mais on doit s'incliner devant les réalités, notamment psychologiques, même si elles sont davantage nourries d'éléments subjectifs et d'information insuffisante que d'objectivité technique et économique.

2.5.5 Scénario «écologiste»

Venons-en donc à un deuxième scénario, que l'on pourrait qualifier d'«écologiste» et qui apparaît à la colonne 4 de la figure 12.

Nous y avons admis que l'on maintiendrait la volonté de pouvoir distribuer 270 PJ d'électricité, mais que la priorité serait cette fois donnée à:
- ne pas construire de nouvelles centrales nucléaires,
- strictement limiter les nouveaux aménagements hydroélectriques,
- réduire les exportations d'électricité.

Les contraintes ainsi mises à l'exploitation des chutes d'eau conduisent à limiter la production hydraulique à 120 PJ/an.

La production nucléaire ne dépasse pas un maximum de 80 PJ/an, peut-être faudrait-il même prévoir un chiffre inférieur, la volonté d'exporter le moins possible pouvant entraîner une baisse du facteur de charge.

Un notable développement des installations de pompage-turbinage reste nécessaire pour ramener à 55 PJ (15 TWh) le volume des exportations (niveau d'il y a 10 ans).

Ces chiffres étant admis, il reste 140 PJ à répartir entre production thermique et importation.

Nous avons admis que la production thermique serait portée à 20 PJ, de façon à ne pas faire supporter tout le poids de ce scénario uniquement par l'importation. Les 15 PJ supplémentaires correspondent à la mise en service de, par exemple, 4 centrales thermiques de 200 MWe (avec un facteur de charge limité à 0,6). Il va de soi que ces 15 PJ correspondent d'autre part à un accroissement d'environ 40 PJ/an des importations de combustibles estimées précédemment.

Dès lors, les importations d'électricité se situent au niveau de 120 PJ/an. Le seul pays qui sera en mesure, s'il le veut bien, de nous assurer un tel sup-

[16] Une centrale de 1000 MWe produit environ 25 PJ, avec un facteur de charge moyen de 0,8.

plément de 75 PJ par rapport au premier scénario est la France. Ce ne pourra être que du courant d'origine nucléaire. Compte tenu de ce que ces importations seront faites aux heures de pleine charge, il s'agira alors de la production d'environ 5 centrales de 1000 MWe (facteur de charge de 0,6).

On voit immédiatement quelques conséquences importantes d'un tel scénario:

- grande dépendance économique à l'égard d'un unique pays, qui est par ailleurs lié au sein de la CEE et pourrait ne pas être libre de répondre préférentiellement aux demandes suisses si des besoins analogues devaient apparaître en RFA, ainsi que cela pourrait bien être le cas. On débouche ainsi vers la nécessité d'assurer le financement de ces centrales si l'on veut être assuré de disposer du courant produit[17]. Il n'est alors pas exclu que l'on nous demande en sus de nous charger des déchets correspondants,
- concentration des sources au voisinage de la frontière franco-suisse, sans cependant que notre pays dispose des moyens de contrôle (fiabilité, sécurité),
- nécessité d'importantes lignes supplémentaires à haute tension pour conduire cette puissance (5000 MW env.) vers les centres suisses de consommation.

En définitive, il semble bien que dans ce scénario, la Suisse serait perdante sur tous les tableaux: indépendance réduite, sécurité moins assurée, perte des postes de travail (construction et exploitation), perte des surplus d'énergie, augmentation des lignes HT.

2.5.6 Scénario «médian»

Cette constatation conduit tout naturellement à rechercher un moyen terme entre les scénarios 1 et 2. C'est celui indiqué en colonne 5 de la figure 12, scénario qualifié de «médian».

Comme toute solution de compromis, il cumule qualitativement tous les inconvénients, mais limite quantitativement chacun d'eux.

Ce scénario médian implique néanmoins la mise en service de *deux nouvelles centrales nucléaires* en Suisse au cours des prochaines années. Il ne restera réalisable que si l'on ne tarde pas trop à mettre en chantier la première d'entre elles, ce qui suppose évidemment une certaine évolution de l'opinion publique vers une appréciation plus objective des risques et des avantages de l'énergie nucléaire.

Ce scénario comporte aussi un accroissement limité de la puissance des centrales thermiques, qui devrait atteindre au total l'ordre de 1600 MWe.

Les exportations étant cependant limitées à 70 PJ (niveau de 1983), les importations se situeraient au voisinage de 60 PJ, soit la moitié de celles envisagées dans le scénario précédent.

On peut espérer qu'un tel scénario médian sera la réalité de la fin du siècle[18] l'émotion soulevée par l'accident de Tchernobyl ayant entre-temps fait place à une appréciation mieux relativisée de l'événement.

2.5.7 Non recours à l'énergie nucléaire

Mais, sous l'emprise de cette émotion, divers milieux ont estimé que l'on devait aller jusqu'à se priver dès que possible de l'énergie de fission, par exemple d'ici 20 ans (certains allant jusqu'à demander l'arrêt immédiat de ces centrales, ce qui permet de mesurer à quel point ces esprits peuvent évoluer hors de la réalité).

Il est indispensable de se faire une opinion sur cette question, car l'attitude à prendre dès à présent ne peut être indépendante de l'estimation faite de la probabilité de pouvoir se passer à terme de cette énergie, ni à quel terme ni avec quelle importance du recours dans l'intervalle ni, enfin, avec quelles solutions de remplacement.

La question paraît à première vue d'une redoutable complexité, mais un examen attentif montre que si les appréciations sont nécessairement grevées de beaucoup d'incertitudes, il ne s'en dégage pas moins très clairement les aspects essentiels, à condition d'entreprendre cet examen à l'échelle mondiale. Cela n'aurait en effet aucun sens que la Suisse, et quelques autres pays isolés, décident d'écarter l'énergie nucléaire alors que dans le même temps le reste du monde y ferait appel de manière croissante.

C'est à cet examen à l'échelle mondiale qu'est consacrée la troisième partie de cet exposé, mais auparavant nous pouvons résumer comme suit cette deuxième partie.

2.6 Deuxièmes conclusions

- La consommation d'énergie distribuée en Suisse en l'an 2000 se situera probablement à 980 PJ/an (± 20). Elle était de 724 PJ en 1985. Il faut donc s'attendre à une augmentation d'environ 35%.
- L'apport des énergies nouvelles renouvelables indigènes (solaire, géothermique, bois, fumier, déchets) couvrira au mieux 5% de ces besoins.
- Le recours aux produits pétroliers se maintiendra à l'ordre de 500 PJ/an (compte tenu d'une diminution comme combustible, et d'un accroissement comme carburant).
- La question principale est celle de la couverture des besoins en électricité, essentielle au bon fonctionnement de l'économie, besoins qui passeront de 149 PJ en 1985 à 270 PJ/an ±10 en 2000, soit 80% de plus.

3. Les besoins d'énergie à l'échelle mondiale et jusqu'au milieu du 21e siècle

Pour évaluer ce que pourrait être la consommation mondiale d'énergie au cours des prochaines décennies, il convient de déterminer comment vont probablement évoluer les effectifs des populations, puis ce que pourrait être l'élévation vraisemblable de leurs niveaux de vie. Il est alors possible d'en déduire une valeur probable de leurs consommations d'énergie (nous avons suivi la même démarche pour la Suisse).

L'évolution des diverses populations doit être examinée séparément, que ce soit du point de vue démographique ou quant au niveau de vie. Il est bien entendu possible de grouper des ensembles importants qui suivent des évolutions analogues: pays industrialisés, Chine populaire, autres pays en voie d'industrialisation, pays moins développés.

Nous nous limiterons ici à l'horizon de 2040, ce qui fait un intervalle de 60 ans à partir des éléments statistiques de 1980 et des années voisines. Cet horizon est suffisamment lointain pour qu'apparaissent nettement les principaux problèmes qu'il faudra affronter et assez proche cependant pour que l'on puisse estimer des ordres de grandeur vraisemblables.

[17] On sait que les sociétés suisses d'électricité ont déjà dû faire des pas substantiels dans cette direction.

[18] Une étude plus fine de la répartition temporelle des besoins en recourant à une analyse des puissances classées ne conduit pas à des conclusions différentes (voir «Les besoins énergétiques de la Suisse en l'an 2000». Fédération Romande pour l'Energie, p. 44ss).

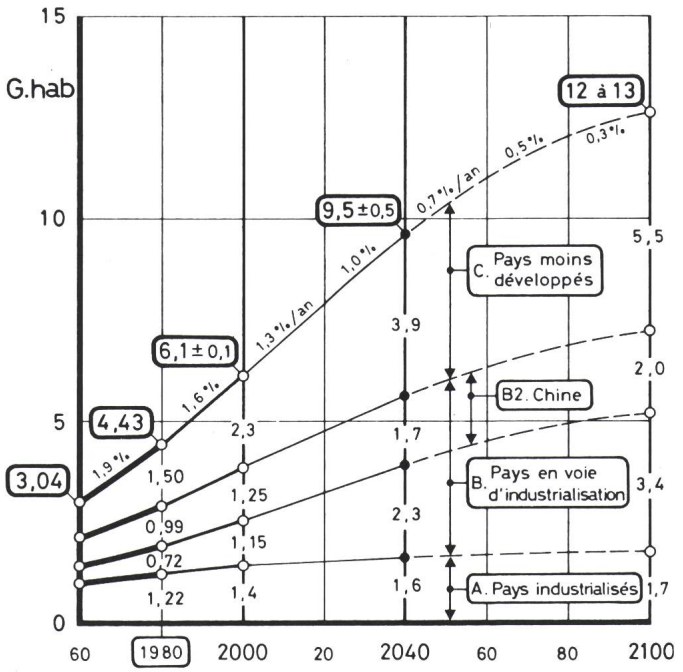


Fig. 13
Evolution probable de la population mondiale

Notons d'emblée qu'il s'agira à nouveau d'énergie primaire, comme dans la première partie de cet exposé.

3.1 Démographie

En ce qui concerne l'évolution démographique, des prévisions nombreuses ont été faites, qui sont relativement concordantes. Cela s'explique par le fait que les taux d'accroissement annuels des populations ne varient que lentement (les adultes de l'an 2020 seront tous nés en l'an 2000 et leurs mères sont déjà nées aujourd'hui et la diminution des naissances est partiellement compensée par l'allongement de la durée de vie).

Ainsi, la population mondiale, qui sera de 4,9 milliards d'habitants à fin 1986, atteindra 6,1 milliards (±0,1, évtl. 0,2) en l'an 2000 et 9 à 10 milliards en 2040. La figure 13 fait apparaître cette évolution, et si les chiffres peuvent sembler élevés, ils n'en supposent pas moins une rapide décroissance des taux annuels d'augmentation:

	1980	2040
Pays industrialisés	0,8%/an	0,2%/an
Pays moins développés	2,3%/an	1,0%/an

Le taux mondial d'accroissement annuel serait dès lors inférieur à 0,3%/an à la fin du siècle prochain. Cela n'est nullement certain, mais il importe que l'estimation de consommation d'énergie qui va suivre ne puisse en aucun cas apparaître comme excessive.

3.2 Niveau de vie

Plus difficile est l'estimation de l'élévation probable du niveau de vie des différents groupes de populations. Les taux les plus incertains sont ceux concernant les pays les moins développés: leurs niveaux de vie sont bas et peuvent s'élever rapidement (on doit bien entendu le leur souhaiter), mais ces taux n'ont pas été particulièrement élevés ces dernières années (env. 3%/an) du fait de la croissance rapide de leurs populations et des difficultés de financement et d'organisation qu'ils rencontrent. Aussi bien leur consommation d'énergie reste-t-elle faible et ne joue-t-elle pas un grand rôle dans le total (34% de la population mondiale en 1980 et 4% de la consommation d'énergie; probablement 42% de la population en 2040 et 11% de l'énergie).

Les gros consommateurs d'énergie sont évidemment les pays industrialisés mais, et cela simplifie les estimations, leurs taux annuels d'accroissement sont faibles, aussi bien en population qu'en niveau de vie. L'erreur probable est ainsi atténuée sur la part la plus grande (27% de la population et 81% de l'énergie en 1980; probablement 17% de la population et 48% de l'énergie en 2040).

Ce sont les pays actuellement en cours d'industrialisation (Chine populaire, Amérique du Sud, Afrique du Nord, Proche-Orient surtout) qui jouent le plus grand rôle dans les modifications apportées par l'évolution: ils ont des croissances démographiques fortes, des niveaux de vie déjà notables et parfois des ressources importantes (39% de la population mondiale et 15% de l'énergie consommée, en 1980; probablement 41% de la population, mais 41% de l'énergie en 2040!).

Ces estimations, dans le détail desquelles nous n'entrons pas ici, conduisent aux consommations indiquées aux figures 14 et 15. La partie située au-delà de 2040 et jusqu'en 2100 n'est là que pour montrer que le fort ralentissement de la croissance (4 à 5%/an de 1960 à 1980 et seulement 1% de 2080 à 2100) n'empêche pas que la consommation totale devienne très élevée quoique en voie de stabilisation.

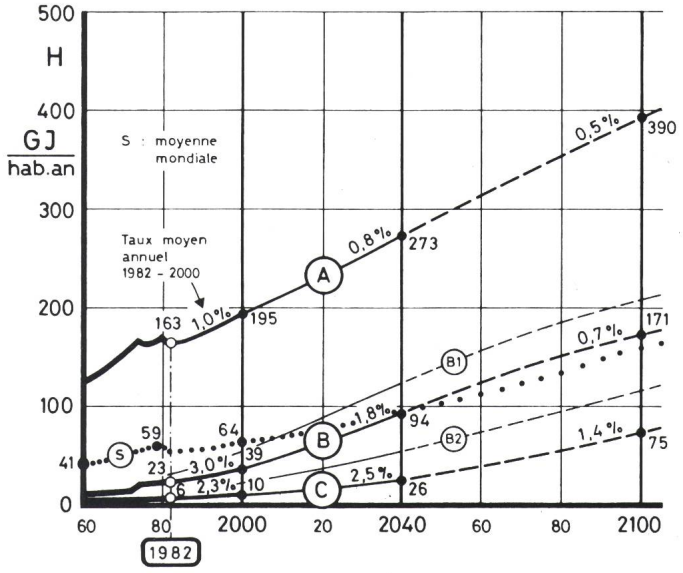


Fig. 14
Evolution possible de la consommation d'énergie primaire par habitant

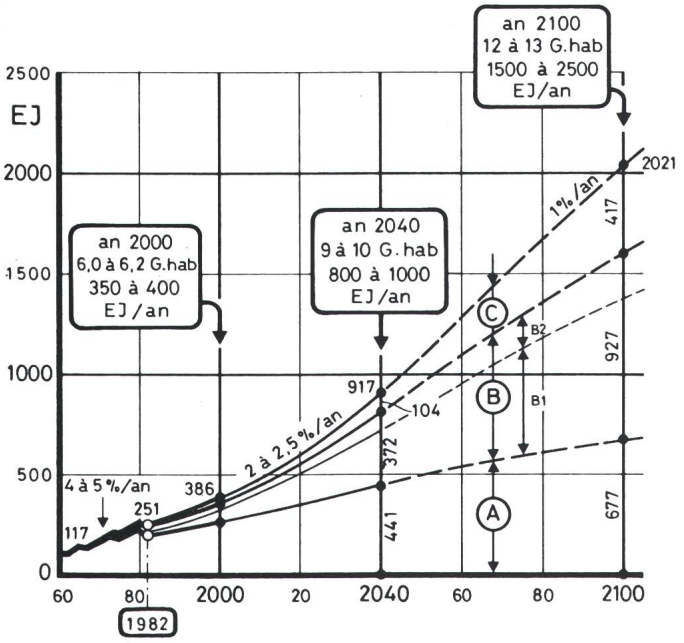


Fig. 15
Evolution possible de la consommation mondiale d'énergie primaire, par groupes de pays

Pour ceux qui craindraient qu'il s'agisse ici de chiffres déraisonnablement élevés et s'écartant d'une réalité possible, nous nous bornerons à noter qu'ils correspondent en 2040 et pour la moyenne des pays industrialisés à une consommation par habitant de 270 GJ/an. Ce niveau a été déjà dépassé aux USA (pour la moyenne des habitants de ce pays) dès 1965, c'est-à-dire il y a 20 ans! Il est largement dépassé déjà aujourd'hui au Canada, et même l'Allemagne de l'Est n'en est que peu éloignée.

Au demeurant, il importe peu ici que ces chiffres soient de 20% ou même 30% trop élevés (ou trop faibles...), car alors ils seraient ceux de 2050 (ou de 2030). Le problème à résoudre n'en est pas modifié qualitativement.

3.3 Ressources en énergies non renouvelables

La première question qui vient à l'esprit est celle de savoir si l'on dispose d'énergies renouvelables ou de réserves de combustibles qui puissent permettre de faire face à de telles consommations.

La figure 16 montre que l'énergie cumulée consommée jusqu'en 2040 ne dépassera pas environ 30 000 EJ (un peu plus de 100 000 EJ jusqu'en 2100).

Les ressources[19] en *combustibles fossiles* peuvent être estimées aujourd'hui à l'ordre de 250 000 EJ (réserves: env. 30 000 EJ); il semble en outre certain que l'on est loin d'avoir découvert tous les gisements. Ces ressources sont estimées à 10 000 EJ pour l'*uranium* utilisé dans des réacteurs «thermiques» (les centrales actuelles), tandis que le recours à une certaine proportion de «surgénérateurs» élèverait ces ressources à l'ordre de 500 000 EJ (le double en utilisant également le thorium) ce qui souligne l'intérêt de ces surgénérateurs.

On voit donc qu'il n'existe pas de problème de ressources énergétiques pour les prochaines décennies, et même semble-t-il pour tout le siècle prochain (ce qui n'exclut pas des tensions temporaires).

3.4 Ressources en énergies renouvelables

On ne peut être aussi optimiste en ce qui concerne les énergies renouvelables, qu'il faut comparer avec la consommation annuelle probable de 800 à 1000 EJ/an au milieu du siècle prochain.

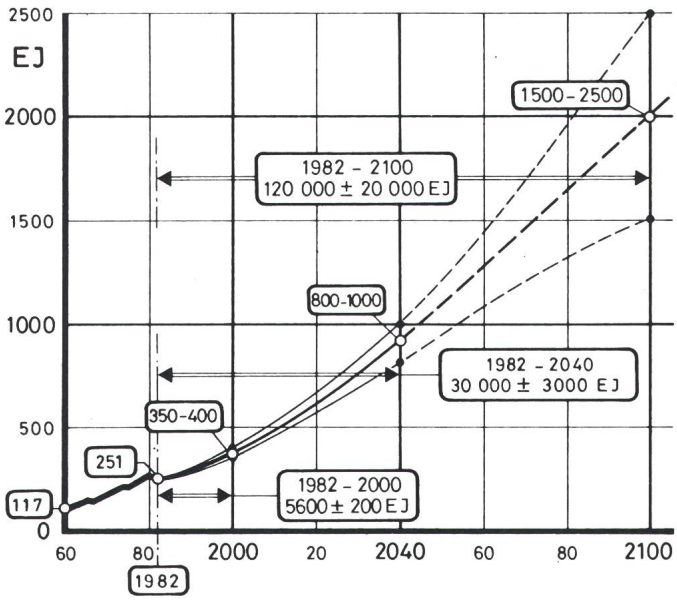
Les ressources hydrauliques totales ne dépassent pas 50 à 100 EJ/an, et encore sont-elles souvent situées hors des zones de consommation. Quant aux énergies éolienne, géothermique, des mers, des déchets, etc., il ne paraît guère possible d'en tirer plus de 1 à 2 EJ/an; leur rôle est donc insignifiant. Le bois est déjà très utilisé et de grandes forêts sont en cours de disparition; il faut à cet égard se rendre compte que pour obtenir 10 EJ/an, il est nécessaire de brûler environ 1 milliard de m³ de bois, c'est-à-dire l'ordre de 100 millions de grands arbres chaque année...

Reste l'*énergie solaire* dont il importe de préciser ce qu'on peut en attendre, puisque c'est la seule ressource abondante en dehors des combustibles fossiles dès lors que l'on désire restreindre au maximum le recours à l'énergie nucléaire de fission.

Partant de la situation qui existe aujourd'hui, il nous faut imaginer un scénario de développement intensif qui permette de situer le maximum envisageable.

Il n'y a pas à notre connaissance d'inventaire général des installations solaires existant aujourd'hui. Des éléments statistiques publiés, il nous semble qu'on peut inférer qu'à l'échel-

Fig. 16
Consommation cumulée possible mondiale d'énergie primaire



[19] Il faut ici distinguer entre «réserves» qui sont prouvées et existent aux conditions économiques actuelles et «ressources» qui sont probables et à des coûts éventuellement plus élevés.

	Surface de capteurs installés	taux annuel d'aug. de S	Surface nouvelle installée	Énergie solaire disponible
1982	1 M.m²		300 000 m²	3 PJ
		~30%		
1990	8 M.m²		2 000 000 m²	24 PJ
		~25%		
2000	75 M.m²		16 M.m²	220 PJ
		~20%		
2010	450 M.m²		35 M.m²	1,4 EJ
		~15%		
2020	2 G.m²		250 M.m²	6 EJ
		12%		
2030	6,0 G.m²		700 M.m²	20 EJ
		9%		
2040	14 G.m²		1 G.m²	40 EJ
		6%		
2060	45 G.m²		2 G.m²	130 EJ
		3%		
2080	80 G.m²		2 G.m²	250 EJ
		2%		
2100	120 G.m²		2 G.m²	360 EJ

Fig. 17
Scénario de développement de recours intensif à l'énergie solaire

le mondiale il pouvait y avoir 1 million de m² de capteurs installés, tous genres confondus, vers 1982.

Partant du chiffre de 2 millions de m² en 1985, nous pouvons supposer un taux annuel de croissance, très élevé au début puisque les chiffres sont encore faibles, par exemple 20%/an ou même 30%/an. Ce taux décroîtra ensuite de telle sorte que les fabrications ne dépassent pas 1 milliard de m² nouveaux par an vers 2040[20].

L'énergie incidente dépend des conditions locales (latitude, altitude, etc.), elle se situe entre 3 et 8 GJ/m²·an. La totalité n'en est pas captée et il convient de tenir compte, ne fût-ce que modérement, du niveau de température généralement bas auquel la chaleur est obtenue, par rapport à celle tirée des combustibles que l'on remplace. Nous utiliserons donc la valeur arrondie de 3 GJ/m²·an (la surface occupée au sol pourrait être de 2 à 3 fois plus élevée).

La figure 17 présente un tel scénario (au-delà de 2040, il faudrait en outre compter avec le remplacement des installations de plus de 20 ou 30 ans d'âge, ce qui conduit à stabiliser l'étendue annuelle des installations nouvelles).

Ainsi, malgré cet énorme effort de développement (dont à vrai dire on peut douter qu'il soit réalisable), conduisant à installer par an 1 milliard de m² nouveaux vers 2040, l'énergie solaire ne pourra à cette époque contribuer au mieux qu'à raison de *40 EJ/an* à la couverture des besoins mondiaux, soit de l'ordre de *5%*.

Cette conclusion ne peut manquer d'être décevante pour tous ceux qui voient dans l'énergie solaire la solution de notre approvisionnement dans quelques décennies. Il faut se convaincre qu'il n'en est rien et que cela tient à la trop faible densité spatiale de cette énergie (GJ/m²·an).

Nous ne nous attarderons pas à la question des investissements qui seraient nécessaires ni à celle du coût de l'énergie produite. Signalons cependant que si, en 2040, la Suisse consomme 0,5% de l'énergie du groupe des pays industrialisés, comme c'est le cas aujourd'hui, les 5% obtenus par captage solaire exigeraient qu'on y affecte environ 100 km² de sol, ce qui semble tout à fait inconcevable. Quant à investir des milliards de francs en régions subtropicales pour transporter ensuite en Suisse l'énergie produite, il n'est pas difficile d'imaginer l'ampleur des problèmes que cela soulèverait.

Nous admettrons néanmoins que ce programme sera réalisé, faisant ainsi «la part belle» à l'énergie solaire! Nous y ajouterons 30 EJ/an en 2040 d'autres énergies renouvelables, principalement hydraulique, pour arriver à un *total de 70 EJ/an.*

3.5 Nouvelles formes d'énergie

Devant la relative modicité de ce chiffre, on en vient à se demander si d'autres sources d'énergie, tout à fait *nouvelles,* ne pourraient pas faire leur apparition dans ce délai d'un demi-siècle et notamment si la *fusion nucléaire* ne sera pas à même de prendre une place importante.

Il va de soi que des découvertes et des inventions diverses seront faites durant les décennies à venir, dont certaines pourraient être importantes. La question est celle du délai nécessaire à leur mise au point, à leur développement à l'échelle industrielle, puis à la multiplication des réalisations au point qu'elles jouent un rôle autre que marginal.

Il ne s'agit pas ici de petites installations ou de pièces fabriquées en très grandes séries exigeant peu de matières premières, comme c'est par exemple le cas en électronique ou en informatique. Pour que des installations thermiques ou nucléaires de production d'électricité puissent consommer par exemple 10 EJ/an d'énergie primaire, elles exigent un investissement de 300 à 600 milliards de francs! Si la moitié de ce montant est constitué par de la main-d'œuvre, il s'agit de 2 à 3 milliards d'heures ou 1 à 2 millions d'hommes/années[21].

C'est ainsi qu'il a fallu environ 30 ans pour passer de la première réaction en chaîne de fission (1942) aux premières grandes centrales commerciales de 1000 MW (1970); 15 ans plus tard, cette énergie ne fournit que 4 EJ d'électricité par an (équivalant à 12 EJ d'énergie primaire).

On peut donc tenir pour assuré que de nouvelles découvertes prochaines n'auront qu'un impact négligeable sur le mode de couverture des besoins énergétiques en 2040.

L'unique espoir notable est à cet égard offert par la *fusion nucléaire,* pour laquelle un considérable effort est en cours, comportant des investissements à l'échelle du milliard de francs. Mais il faut rappeler que si le phénomène physique est connu depuis 50 ans, on n'a pas encore réussi à dégager en laboratoire de l'énergie de fusion en quantité macroscopique et de manière contrôlée. Il semble toutefois que cela ne saurait tarder.

Il n'en restera pas moins un long

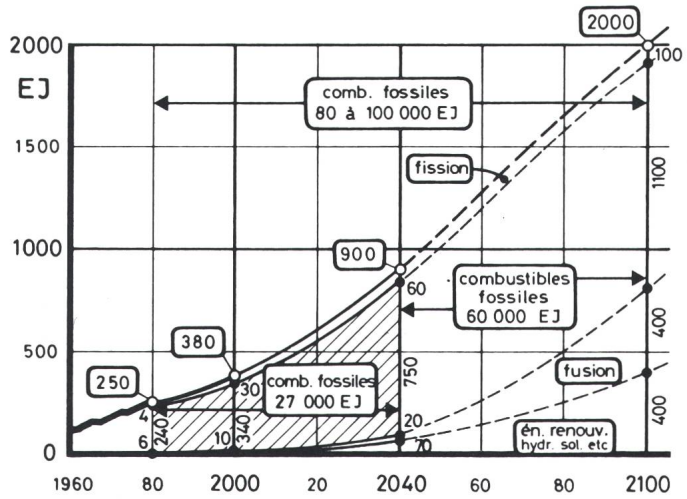
[20] On pourrait alors avoir dans ce secteur une industrie de fabrication d'une ampleur comparable à celle de toute l'industrie automobile mondiale actuelle...

[21] 10 EJ/31,5 M.s/an = 0,32 TW.
Avec un facteur de charge de 0,8 et un rendement de 0,4 (c. therm.) ou 0,3 (c. nucl.), la puissance installée est de 160 GWe (c. therm.) ou 120 GWe (c. nucl.). A 2 Gfr./GWe (c. therm.) ou 5 Gfr./GWe (c. nucl.), l'investissement est de 320 ou 600 Gfr. Si la moitié est de la main-d'œuvre, à 100 fr./h en moyenne, il s'agit de 1,6 à 3 milliards d'heures, ou 0,9 à 1,6 millions d'hommes·années, soit du travail pour 200 000 hommes pendant 5 à 10 ans.

chemin à parcourir avant que ne soit mise en service une première centrale prototype (10 à 100 MW vers l'an 2000–2010), puis de premières centrales à grande puissance (1000 à 2000 MW thermiques vers 2020 peut-être). Il pourrait ainsi y avoir en 2040, tous problèmes techniques et de sécurité supposés résolus, 100 à 200 centrales de 5000 MW produisant *10 à 20 EJ/an* d'énergie thermique.

Les réflexions qui précèdent nous paraissent montrer à l'évidence, et quelle que soit l'incertitude des chiffres, que vers le milieu du 21e siècle l'humanité ne pourra compter que sur deux sources d'énergie à l'échelle des besoins: les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire de fission (avec une part de surgénérateurs).

Fig. 18
Couverture des besoins mondiaux en énergie primaire; cas du faible recours à l'énergie de fission



3.6 Cas du faible recours à l'énergie de fission

Si l'on part de l'idée que dans le contexte politique actuel la part de l'énergie nucléaire ne peut être que faible, on aboutit inévitablement à un scénario voisin de celui présenté à la figure 18. On y voit que la consommation cumulée en combustibles fossiles serait de l'ordre de 25 000 à 30 000 EJ entre 1980 et 2040, ce qui, répétons-le, ne pose pas de problème au niveau des ressources.

Cela en pose par contre un, très important, au niveau de la pollution de l'atmosphère. On peut tenir pour probable qu'au cours de ces prochaines décennies, l'on améliorera les conditions de combustion de telle sorte que les émissions parasites soient supprimées ou tout au moins maintenues à un niveau acceptable, qu'il s'agisse d'oxydes de soufre ou d'azote ou d'autres nuisances. Mais ce que l'on ne peut pas diminuer est la production de dioxyde de carbone CO_2, puisque c'est précisément elle qui libère l'énergie que nous voulons. Ce CO_2 est rejeté dans l'atmosphère où il se disperse et ne peut plus être récupéré; l'opération est irréversible

On connaît assez exactement la quantité de CO_2 ainsi rejetée (env. 22 milliards de tonnes en 1985). Répartie dans le volume total de l'atmosphère, cette quantité correspondrait actuellement à un accroissement annuel de la teneur de l'air en CO_2 de 2,5 millionièmes (2,5 ppm). Comme le montre la figure 19, on mesure cette teneur depuis plusieurs décennies; elle se situe aujourd'hui à 350 ppm et elle augmente lentement et régulièrement de 1,6 ppm/an. La différence, de 0,9 ppm, correspond au CO_2 assimilé par les plantes et dissous dans l'eau à la surface des mers.

On sait depuis longtemps que la présence de CO_2 dans l'air produit un effet de serre (tout comme le verre de nos vitres): la lumière visible traverse l'atmosphère, du moins en grande partie, tandis que le rayonnement calorifique (infrarouge) émis par le sol est empêché de passer[22]. Or, la planète reçoit du soleil une énergie considérable; pour que la température au sol reste constante, il faut que la Terre réémette exactement la même énergie que celle qu'elle reçoit. Ainsi, cette température s'est-elle établie à environ 288 K (15 °C) en moyenne.

La teneur de l'air en CO_2 augmentant, le rayonnement émis par la Terre ne peut passer que si sa longueur d'onde s'élève, c'est-à-dire si la température au sol s'élève.

[22] Le lecteur physicien pardonnera cette présentation très simplifiée! Pour être plus précis, disons que 49% de rayonnement solaire atteint le sol, dont 6% sont simplement réfléchis. Le reste, 43%, est absorbé par la surface. Ces 43% sont réémis mais pour qu'ils traversent l'atmosphère, la température au sol doit s'élever à 288 K.

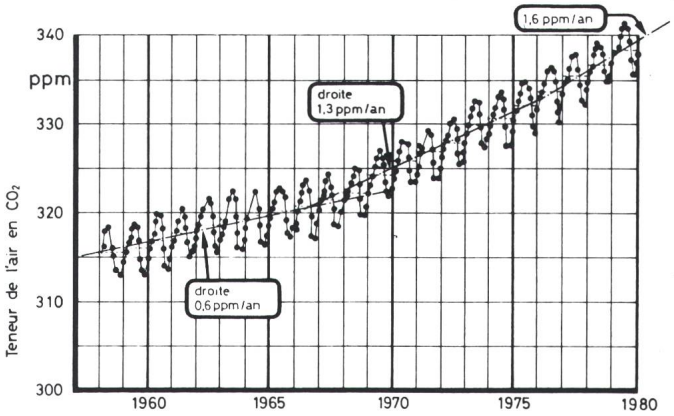
Il semble que la température actuelle soit déjà de 0,3 à 0,7 °C supérieure à celle qu'elle serait si les hommes n'avaient pas rejeté autant de CO_2 dans l'atmosphère depuis le début du siècle.

Ces rejets allant croissant, cet effet de serre va s'accentuant, et ce phénomène fait depuis quelques années l'objet d'études de plus en plus importantes. Divers éléments viennent accroître cette évolution, tels qu'autres rejets dans l'atmosphère, augmentation de l'humidité de l'air, recul des surfaces enneigées et réfléchissantes, etc.

Il est généralement admis aujourd'hui que si la teneur de l'air en CO_2 devait atteindre 500 ppm, la température au voisinage du sol s'élèverait de 1,5 à 4,5 °C dans nos régions et davantage en hautes latitudes, cela compte tenu des autres effets mentionnés. Cette situation pourrait se présenter lorsque l'on aura brûlé 20 à 40 000 EJ de combustibles fossiles. C'est la situation que présente le scénario de la figure 18 vers 2040.

Il est bien entendu difficile de prédire exactement ce que pourraient être les conséquences d'un tel réchauffe-

Fig. 19
Variation de la teneur de l'air en CO_2 à Hawaii
(selon C.D. Keeling, 1982)



ment. Les études faites montrent qu'il pourrait s'agir de profonds changements climatiques, modifiant fortement l'hydrologie et conduisant à devoir changer de cultures dans des régions étendues (à l'échelle d'un continent). Le niveau des mers s'élèverait (0,2 à 1,2 m) et de très graves désertifications apparaîtraient.

Dans l'état actuel des connaissances, encore très insuffisantes et surtout insuffisamment précises, on voit que le phénomène paraît devoir être d'une redoutable ampleur et qu'il ne sera pas réversible. Des conséquences catastrophiques pourraient apparaître dès avant le milieu du siècle prochain. Les études de ces effets doivent donc être accélérées et approfondies afin que l'on puisse mieux en apprécier la portée[23]. Devant de telles perspectives, il ne saurait être question de rester passif et d'attendre que la catastrophe se confirme pour commencer à réagir, tant parce que le phénomène n'est pas réversible que du fait de l'impossibilité d'arrêter du jour au lendemain le recours aux combustibles fossiles.

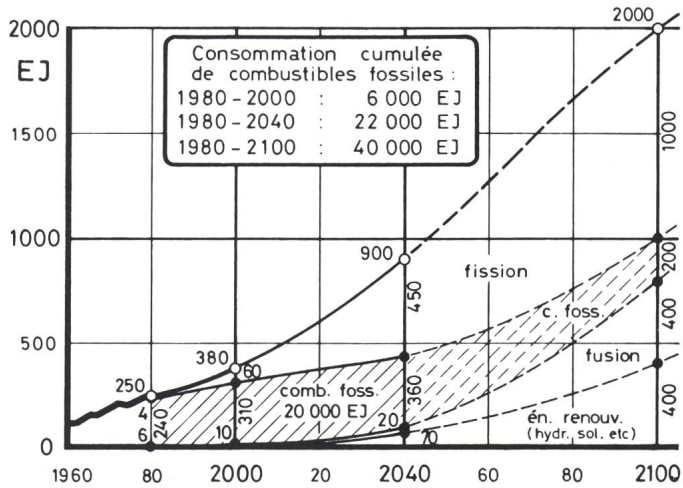
Si l'on ne veut pas se trouver dès 2030 ou 2040 devant une situation de la plus grande gravité, c'est probablement dans 10 ans déjà que de premières mesures devraient être prises visant à stabiliser la consommation en combustibles fossiles. Or, il faut se convaincre, nolens volens, que l'unique possibilité de limitation à disposition dans ce délai et jusqu'au milieu du siècle prochain est un recours accru, fortement accru même, à l'énergie nucléaire de fission.

Le plus tôt les autorités en seront-elles persuadées, à tous les niveaux, et l'opinion publique informée et convaincue, et le mieux ce sera.

C'est un tel scénario, avec stabilisation de l'emploi des combustibles fossiles, recours maximal à l'énergie solaire et à la fusion et complément par la fission que présente la figure 20. Il va de soi que la courbe définissant sur cette figure l'utilisation des combustibles fossiles n'est pas dessinée au hasard: elle correspond à un scénario possible de développement nucléaire eu égard aux contingences industrielles et financières. Ce scénario implique en particulier l'aménagement d'importants réseaux de chauffage urbain à partir de réacteurs nucléaires.

[23] Les participants au Congrès international de Villach, en octobre 1985, ont lancé un pressant appel à tous les gouvernements pour les inciter à prendre conscience du problème.

Fig. 20
Couverture des besoins mondiaux en énergie primaire; cas d'un recours aux combustibles fossiles limité par la concentration de CO_2 dans l'air



3.7 Troisièmes conclusions

- Vers l'an 2040, la population mondiale atteindra 9 à 10 milliards d'habitants (1986: 4,9 milliards).
- Compte tenu de la nécessaire, et inévitable, élévation des niveaux de vie, la consommation mondiale d'énergie primaire pourrait s'établir alors à 800 à 1000 EJ/an (1986: env. 300 EJ).
- Ces besoins ne pourront être couverts que dans la proportion de un dixième par les énergies renouvelables (principalement hydraulique) et la fusion nucléaire (au début de son développement).
- La limitation du recours à l'énergie nucléaire actuelle (de fission) entraînera la poursuite de l'utilisation intensive des combustibles fossiles, dont il existe des ressources suffisantes.
- Cependant dans l'état actuel des connaissances il est admis que le rejet dans l'atmosphère des énormes quantités de gaz carbonique ainsi dégagées provoquera (par effet de serre) de très graves variations climatiques aux conséquences catastrophiques.
- L'unique moyen à disposition pour l'éviter est de stabiliser, puis restreindre, la consommation de combustibles fossiles, ce qui n'est possible que par un recours accru à l'énergie nucléaire.
- Dès lors, la question n'est pas de savoir si l'on peut se passer de l'énergie nucléaire, comme certains le préconisent, mais comment s'y prendre pour pouvoir continuer à l'utiliser

Ces conclusions conduisent à se demander quelle position il faut prendre face au grave accident de la centrale soviétique de Tchernobyl. C'est ce que nous voulons esquisser maintenant.

4. L'accident de Tchernobyl et ses conséquences

Qu'il nous soit permis de commencer cette partie en rendant hommage au courage et à l'esprit de sacrifice de ceux qui, à Tchernobyl, sont intervenus dès l'accident pour en limiter l'ampleur; nombreux y ont laissé leur vie ou la perdront dans les mois à venir. Sans doute convient-il aussi, avant de passer à des considérations techniques, d'avoir le regard tourné un instant vers les milliers de personnes qui subissent actuellement les conséquences de cet accident, ne serait-ce que par le fait qu'elles ont dû quitter précipitamment leurs logements, et pour un temps indéterminé.

Cela dit, la question essentielle dans le cadre de cet exposé est d'apprécier si cet accident a, par sa nature et son ampleur, une portée générale justifiant la remise en cause de toute utilisation de l'énergie nucléaire ou s'il s'agit, si grave soit-il, d'un accident particulier, de portée limitée, ne mettant en cause qu'un type déterminé de centrale ou la manière dont ce type est ou a été utilisé.

L'on est assez bien renseigné sur les caractéristiques techniques des centrales RBMK soviétiques et, depuis peu, sur les circonstances de l'accident, dont l'analyse détaillée en cours fournira de nombreux enseignements, pour les Soviétiques tout d'abord mais également pour toute la communauté technique internationale.

4.1 Les centrales soviétiques RBMK

Ces centrales RBMK sont dotées d'un réacteur à eau bouillante, modéré au graphite mais dont la cuve d'acier qui nous est familière est remplacée par des tubes de zirconium, réacteur par ailleurs dépourvu d'un bâtiment d'enveloppe résistant à la pression.

Ce sont ces caractéristiques, brièvement énumérées, qui font que ces RBMK sont potentiellement moins sûrs que les réacteurs occidentaux et que leur construction n'aurait certainement pas été autorisée en Occident.

Cela provient par exemple du fait qu'un accroissement de l'ébullition de l'eau de refroidissement entraîne une diminution de la densité du fluide eau-vapeur et de son absorption de neutrons, alors que le pouvoir modérateur du graphite reste inchangé. On parle d'un «coefficient de vide» positif; les conditions de la réaction s'améliorent et la puissance dégagée croît.

Ainsi le réacteur n'est-il pas naturellement stable, à l'opposé des réacteurs à eau bouillante occidentaux (où l'eau sert de modérateur et la diminution de sa densité entraîne automatiquement le ralentissement de la réaction). C'est à cela qu'il faut probablement attribuer la brusque montée en puissance du réacteur lors de l'accident (échappant au contrôle parce que le dispositif de réglage automatique avait été débranché). On parle d'une très brève pointe pouvant avoir atteint 100 fois la puissance nominale (donc env. 300 000 MWth) qui a entraîné la destruction mécanique d'une partie au moins du réacteur.

Cette moins grande sécurité provient aussi de l'utilisation de zirconium pour les tubes sous pression (zirconium choisi parce qu'il absorbe peu les neutrons et permet l'utilisation d'un uranium moins enrichi). Si la température de l'eau s'élève accidentellement au voisinage de 1000 °C (normalement env. 300 °C), il y a réaction chimique avec le zirconium et dégagement d'hydrogène. Ce gaz peut ensuite former avec l'air un mélange détonnant, à l'explosion duquel il faut, semble-t-il, attribuer la destruction du bâtiment.

La moins grande sécurité est aussi due à l'absence d'un bâtiment-enveloppe étanche et résistant à la pression, l'enceinte de confinement. C'est cette enveloppe – d'ailleurs double dans les centrales suisses – qui a retenu la quasi-totalité des substances radioactives libérées lors du grave accident de la centrale américaine de Three Mile Island II en 1979[24].

On pourrait aussi noter la grande longueur des tubes sous pression, conduisant aisément à des instabilités hydrodynamiques de l'écoulement du mélange eau-vapeur. A noter également la masse du graphite (env. 1000 t) qui est du charbon pur et peut alimenter un incendie[25] en présence d'eau pouvant se dissocier et alimenter le feu en oxygène.

4.2 Le rôle des RBMK en URSS

Si discutable qu'il nous paraisse dans ses principes technologiques, ce type de centrale a néanmoins été régulièrement développé par les Soviétiques, et eux seuls, depuis 30 ans. Ainsi, 23 réacteurs ont-ils été mis en service avec des puissances électriques passant par étapes de 100 à 1500 MWe (Leibstadt: 990 MWe), 6 autres étaient en construction au moment de l'accident et des projets sont en cours de mise au point allant jusqu'à la puissance unitaire de 2400 MWe.

C'est dire que les Soviétiques étaient satisfaits des performances de ce type RBMK. Il semble que les raisons en aient été tout d'abord le coût favorable (ce qui ne doit pas surprendre, car on sait que la sécurité est chère) mais aussi le fait que le système des tubes sous pression en lieu et place d'une cuve permet l'augmentation de la puissance par simple accroissement du nombre des tubes placés en parallèle. L'absence d'enceinte de confinement contribue aussi à rendre aisé ce développement.

Du fait de leur économie neutronique peu favorable, ces réacteurs exigent le rechargement continu du réacteur. En d'autres termes, des éléments de combustibles sont constamment (plusieurs fois par jour?) introduits ou déplacés d'un tube dans un autre (il y a 1700 tubes pour 1000 MWe). Les anciens réacteurs français à graphite ou leurs homologues anglais se trouvent dans le même cas. Il s'agit bien entendu d'opérations délicates faites à l'intérieur d'un réacteur en marche, donc sous pression (60 atm env.). Ce gros inconvénient présente cependant un intérêt à un autre égard: il permet l'extraction régulière du plutonium 239 qui résulte inévitablement de ce que l'uranium 238 (non fissile mais représentant 98% du combustible à Tchernobyl) est placé dans le flux de neutrons. C'est un moyen économique d'obtenir de la matière fissile pure à des fins militaires. Dès lors, on peut comprendre que les Soviétiques n'aient pas voulu exporter ce type de centrale ni en admettre l'inspection par l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique.

Les dispositions techniques qui viennent d'être rappelées, succinctement, ne donnent pas la cause de l'accident mais elles permettent d'en comprendre l'ampleur exceptionnelle. Celle-ci résulte donc bien de circonstances tout à fait particulières et propres à ce type RBMK soviétique: «coefficient de vide» positif, réaction zirconium-eau, pas d'enceinte de confinement, d'où pointe incontrôlée de puissance, explosion, libération des substances radioactives.

4.3 Les causes directes de l'accident

Il faut maintenant souligner que l'accident lui-même a été la conséquence d'un programme d'essai visant à étudier des conditions très particulières de fonctionnement. Ce n'est pas ici le lieu de discuter de l'intérêt de ces essais, mais le fait est que ce programme a conduit à mettre hors circuit une notable partie des dispositifs de sécurité (d'une centrale à la sécurité générale déjà insuffisante), que l'essai de fin avril 1986 ne s'est pas déroulé comme escompté et qu'ainsi l'opérateur a pris d'autres mesures non prévues et qui ont encore aggravé les choses (cela étant déclaré par le gouvernement de l'URSS). Tant et si bien que l'arrêt d'urgence du réacteur (introduction automatique des barres absorbantes de neutrons) ne s'est pas produit et que l'opérateur n'est pas non plus parvenu (tardivement?) à le déclencher. C'est la seule et unique fois que, à notre connaissance, une telle circonstance se soit produite dans une centrale nucléaire.

4.4 La portée de l'accident

Il nous semble donc clair que l'on ne peut pas condamner toute utilisation de l'énergie nucléaire parce qu'un pays a développé un type de centrale qui n'offre de toute évidence pas la sécurité voulue et qu'on y a tenté des essais inconsidérément programmés et de surcroît dangereusement conduits.

[24] De même lors de l'accident, de gravité comparable, de la petite centrale expérimentale de Lucens, en 1969.

[25] C'est ce qui s'est passé à Windscale en 1957, mais ce réacteur, ancien, était encore refroidi à l'air (les réacteurs occidentaux utilisant du graphite sont refroidis par du CO_2).

Cela reviendrait à supprimer toute l'aviation civile parce qu'un certain type d'avion n'a pas une sécurité suffisante (par exemple la structure de l'arrière du fuselage des Boeing 747, source de l'accident des Japan Air Lines ayant fait plus de 500 morts). Cependant, cette conclusion n'est aussi claire qu'à la condition d'être suffisamment renseigné sur la sécurité offerte par les autres types de centrales, notamment occidentales, et leur mode d'exploitation. Cette appréciation est difficile pour nos autorités et (encore davantage?) pour les médias, ces derniers étant par ailleurs souvent (trop souvent?) sensibles au caractère sensationnel des faits et ayant peine à ne pas l'exploiter... Ainsi l'homme de la rue est-il pour le moins perplexe, parfois inquiet ou même angoissé, angoisse naturellement alimentée par l'impossibilité apparente des gouvernements à maîtriser l'accroissement démentiel de l'armement nucléaire.

Une vision correcte des choses exige tout d'abord, nous semble-t-il, un effort soutenu de compréhension des faits tant par les autorités que par les médias, et finalement tout un chacun; ce n'est pas l'information qui manque, que de nombreux organismes indépendants s'efforcent de présenter de manière simple et aisément accessible. Il faut aussi qu'une confiance raisonnable soit accordée aux organismes nationaux et internationaux (telle l'AIEA) où l'on rencontre des professionnels compétents et responsables.

4.5 Les conséquences

Nous n'aborderons pas ici, car cela sort manifestement du cadre de cet exposé, la question des conséquences de l'accident sur les populations, la faune ou la flore des régions voisines de Tchernobyl ou lointaines. Il est certain qu'une quantité considérable de radioactivité a été disséminée (on parle de 50 millions de curies, c'est-à-dire l'équivalent de 50 tonnes de radium), même si ce ne sont probablement que les 3 à 4% du total des substances radioactives que contenait le cœur du réacteur lors de l'accident. Il est sans doute trop tôt pour se permettre une appréciation précise des conséquences, mais on doit s'attendre à ce que celles-ci soient importantes dans la région voisine (rayon de 10 à 30 km autour de la centrale), limitées au-delà et faibles voire quasi-insignifiantes dans le reste de l'Europe (sauf éventuellement quelques points localisés).

Il est certainement imprudent de se hasarder à des spéculations sur le nombre possible des décès différés induits au cours des prochaines décennies; ces spéculations, dont il nous paraît que les médias sont trop friands, sont toujours difficiles (même lorsqu'on est beaucoup mieux renseigné), généralement discutables, parfois tendancieuses; la fausseté de leurs conclusions est souvent démontrée ultérieurement, sans retenir autant l'attention... A titre d'exemple, rappelons les déclarations américaines affirmant immédiatement après l'accident qu'il y avait localement de 1000 à 2000 morts, alors qu'il est admis aujourd'hui qu'il n'y en avait que 2 à ce moment-là; on doit aussi rappeler la fable de l'incendie d'un deuxième réacteur à Tchernobyl, issue d'une mauvaise interprétation de photos de satellite. A l'époque, les médias ont largement diffusé ces informations.

Il est d'autre part nécessaire que l'homme de la rue se familiarise avec la radioactivité, omniprésente, et apprenne à juger ce que signifie pour lui une exposition de par exemple 50 millirems (c'est ce que pourrait recevoir le Suisse, en moyenne, durant la première année suivant l'accident) alors qu'il en recevra bien davantage, de 200 à 500 p.ex., d'autres sources durant la même période[26]. Cette légère radioactivité ambiante n'a d'ailleurs pas que des effets négatifs et l'on commence, semble-t-il, à en mieux cerner les effets bénéfiques.

4.6 Poursuite ou arrêt du recours au nucléaire

Quant au moratoire que certains voudraient afin, déclarent-ils, que l'on dispose d'un temps de réflexion, l'initiative déposée donnera largement l'occasion d'en débattre. Mais on doit dès à présent relever, à partir des réflexions faisant l'objet du début de l'exposé, que l'on pourrait payer cher les entraves qui seraient mises à l'utilisation de l'énergie nucléaire, que ce soit à l'échelle suisse d'ici à la fin du siècle (conséquences économiques, politiques et écologiques) ou que ce soit à l'échelle mondiale au cours du siècle prochain: possibilité de dramatiques conséquences climatiques à une échelle sans commune mesure avec celles de l'accident de Tchernobyl.

Mais peut-être la communauté internationale devrait-elle demander (exiger?) un moratoire dans l'exploitation des 22 autres réacteurs RBMK soviétiques. Car, si le rapport soviétique à l'AIEA est sévère pour les responsables de l'exploitation de Tchernobyl et fait état des mesures prises en URSS pour écarter à l'avenir de telles fautes d'exploitation, il ne reconnaît pas l'insuffisance de la sécurité de ces centrales. Ceux qui prônent un moratoire en Suisse ne devraient-ils pas être alarmés de ce que l'URSS continue à exploiter ses RBMK? Quoi qu'il en soit, le gouvernement soviétique a déclaré qu'il entendait poursuivre, et accélérer, le recours à l'énergie nucléaire, ayant l'intention de multiplier par 5 à 7 la puissance installée d'ici à la fin du siècle (donc de la porter de 17 GWe à 100 GWe; en Suisse, actuellement, moins de 3 GWe et 5 GWe en l'an 2000 avec le scénario «médian» présenté en deuxième partie ci-dessus).

4.7 Quatrièmes conclusions

- Les centrales soviétiques du type RBMK ont des caractéristiques techniques particulières et présentent une insuffisance de sécurité inacceptable selon les critères occidentaux.
- L'accident est la conséquence directe d'un programme spécial d'essai, comportant des risques inconsidérés et dangereusement conduit.
- L'exceptionnelle ampleur de l'accident, incontestable, résulte de la combinaison des graves fautes du programme et de celles, non moins graves, de son exécution, avec les notables faiblesses intrinsèques de la centrale.
- Il s'agit donc d'un cas très particulier, à plus d'un titre, qui ne peut en aucune manière justifier une remise en cause générale du recours à l'énergie nucléaire.
- Un large recours à cette énergie paraissant inévitable à l'échelle mondiale dans les années à venir, la seule attitude raisonnable est d'en poursuivre le développement avec des exigences de sécurité sans cesse réexaminées et perfectionnées.
- Par ailleurs, on doit souhaiter que l'homme de la rue, aidé en cela par les médias, se familiarise avec la radioactivité, omniprésente, et l'énergie nucléaire, indispensable. Les débats devraient pouvoir ainsi perdre un caractère subjectif voire passionnel qui ne peut que conduire à des prises de position erronées (filles de l'ignorance et de la peur).

[26] Le risque de cancer induit par une exposition 20 fois plus importante de 1 rem = 1000 mrem est le même que celui résultant de la consommation de 2 cigarettes par mois!