

# **Perspectives énergétiques**

à moyen et long termes

à l'échelle mondiale et en Suisse

---

*Prof. hon. EPFL dr André Gardel*







# TABLE DES MATIÈRES

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCTION .....</b>   | <b>5</b>  |
| <br>  |           |
| <b>PREMIÈRE PARTIE:</b>   |           |
| <b>PERSPECTIVES ÉNERGÉTIQUES À L'ÉCHELLE MONDIALE, À LONG TERME .....</b>                                 |           |
| <b>Chapitre 1:</b>  |           |
| <b>CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE ET ÉVOLUTION PROBABLE À LONG TERME .....</b>                           | <b>7</b>  |
| § a) Situation actuelle .....   | 7         |
| § b) Evolution à venir de la consommation mondiale .....  | 11        |
| <br>  |           |
| <b>Chapitre 2:</b>  |           |
| <b>MODE DE COUVERTURE DES BESOINS MONDIAUX EN ÉNERGIE .....</b>   | <b>17</b> |
| § a) Combustibles fossiles .....  | 17        |
| § b) Energie hydraulique .....  | 18        |
| § c) Energie nucléaire .....  | 18        |
| § d) Autres énergies .....  | 18        |
| § e) Energie solaire .....  | 18        |
| § f) Apparition et développement de nouvelles sources d'énergie .....                                     | 19        |
| § g) Fusion nucléaire .....   | 20        |
| § h) Conclusion quant aux possibilités de couvrir les besoins énergétiques mondiaux vers 2040 .....       | 21        |
| <br>  |           |
| <b>Chapitre 3:</b>  |           |
| <b>CONSÉQUENCES ET DANGERS DE L'UTILISATION DES COMBUSTIBLES FOSSILES ET DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE .....</b> | <b>21</b> |
| § a) Utilisation des combustibles fossiles .....  | 21        |
| § b) Dangers de l'énergie nucléaire .....   | 23        |
| § c) Conclusion quant à la comparaison «combustibles fossiles – nucléaire» .....                          | 26        |
| § d) Essai de projection jusqu'en l'an 2100 .....   | 26        |
| <br>  |           |
| <b>DEUXIÈME PARTIE:</b>   |           |
| <b>PERSPECTIVES ÉNERGÉTIQUES SUISSES À MOYEN TERME .....</b>  |           |
| <b>Chapitre 4:</b>  |           |
| <b>CONSOMMATION SUISSE ACTUELLE ET ÉVOLUTION RÉCENTE .....</b>  | <b>29</b> |
| <b>Chapitre 5:</b>  |           |
| <b>CORRÉLATION «PIB/HAB. – ÉNERGIE DISTRIBUÉE» .....</b>  | <b>30</b> |
| § a) Evolution du PIB par habitant .....  | 30        |
| § b) Relation entre PIB et composants de l'énergie distribuée .....                                       | 31        |
| <b>Chapitre 6:</b>  |           |
| <b>CONSOMMATION SUISSE D'ÉNERGIE DISTRIBUÉE JUSQU'EN 2010 .....</b>                                       | <b>36</b> |
| § a) Evolution de la population suisse .....  | 36        |
| § b) Evolution de la consommation totale d'énergie distribuée .....                                       | 36        |
| § c) Répartition probable de l'énergie distribuée .....   | 37        |
| § d) Appréciation générale .....  | 38        |

# TABLE DES MATIÈRES

(Suite)

**Chapitre 7:**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>MODES DE COUVERTURE DES BESOINS PROBABLES EN ÉNERGIE DISTRIBUÉE .....</b> | <b>39</b> |
| § a) Combustibles .....  | 39        |
| § b) Carburants .....  | 41        |
| § c) Electricité .....   | 42        |
| c1 Exportation et importation .....  | 42        |
| c2 Couverture des besoins supplémentaires .....                              | 43        |

**Chapitre 8:**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>DÉCISIONS POPULAIRES DU 23 SEPTEMBRE 1990 ET CONSÉQUENCES .....</b>                            | <b>46</b> |
| § a) Les limitations que peut envisager l'Autorité fédérale .....                                 | 46        |
| § b) Quelques observations générales .....  | 46        |
| § c) Les priorités .....  | 48        |
| § d) Lutte contre l'effet de serre, recours à l'électricité et au nucléaire .....                 | 48        |
| § e) Quelques remarques sur les aspects psychologiques et politiques des questions évoquées ..... | 49        |

**Chapitre 9:**

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| <b>CONCLUSIONS GÉNÉRALES .....</b> | <b>50</b> |
|------------------------------------|-----------|

**ANNEXE A:**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>QUALITÉ ET COHÉRENCE DES STATISTIQUES ÉNERGÉTIQUES .....</b> | <b>55</b> |
|---|-----------|

**ANNEXE B:**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>POPULATION, PIB ET ÉNERGIE PRIMAIRE CONSOMMÉE DANS LES PRINCIPAUX PAYS .....</b> | <b>59</b> |
|---|-----------|

**ANNEXE C:**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CORRÉLATION «NIVEAU DE VIE –<br/>CONSOMMATION D'ÉNERGIE À PARTIR DES DONNÉES DE LA BANQUE MONDIALE .....</b> | <b>62</b> |
|---|-----------|

**ANNEXE D:**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>PRÉVISIONS DE CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE PRIMAIRE DE 1990 À 2040 .....</b> | <b>65</b> |
|--|-----------|

**ANNEXE E:**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÉNERGIE NUCLÉAIRE DE FISSION: CONVERSION ET SURGÉNÉRATION .....</b> | <b>68</b> |
|--|-----------|

**ANNEXE F:**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CONSOMMATION DE COMBUSTIBLES EN SUISSE .....</b> | <b>70</b> |
|---|-----------|

**ANNEXE G:**

|                                   |           |
|-----------------------------------|-----------|
| <b>CONCEPT DE L'EXERGIE .....</b> | <b>74</b> |
|-----------------------------------|-----------|

**ANNEXE H:**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>LE BILAN ÉNERGÉTIQUE SUISSE .....</b> | <b>79</b> |
|--|-----------|

**ANNEXE J:**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>LOCALISATION ET ESTIMATION DES PERTES DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE EN 1989 .....</b> | <b>86</b> |
|---|-----------|

# LISTE DES FIGURES

|  |    |
|--|----|
| 1. Population, énergie consommée, PIB, répartition par groupes de pays, évolution 1975-1985 .....                        | 7  |
| 2. Corrélation «Produit intérieur brut R – Energie primaire consommée H par habitant .....                               | 8  |
| 3. Corrélation «PIB – Energie primaire» par habitant .....   | 10 |
| 4. Evolution possible de la consommation d'énergie primaire par habitant, par an .....                                   | 13 |
| 5. Evolution probable de la population mondiale .....  | 15 |
| 6. Evolution possible de la consommation mondiale en énergie primaire .....  | 16 |
| 7. Essai de projection jusqu'en 2100 de la consommation mondiale d'énergie primaire et mode de couverture .....          | 27 |
| 8. Produit intérieur brut par habitant en Suisse en francs 1970 .....  | 31 |
| 9. Corrélation «PIB/hab. – Energie distribuée» par an, en Suisse (Francs 1970) .....                                     | 32 |
| 10. Energie distribuée, consommée par habitant (GJ/hab. an) et PIB par habitant (Francs 1970) .....                      | 32 |
| 11. Relation «PIB – Energie distribuée» par habitant, selon nature de l'énergie .....                                    | 33 |
| 12. Corrélation «PIB – Carburants distribués» par habitant et par an, en Suisse .....                                    | 34 |
| 13. Corrélation «PIB – Electricité distribuée» par habitant et par an, en Suisse .....                                   | 34 |
| 14. Evolution passée et future possible de la population suisse .....  | 37 |
| 15. Répartition des combustibles 1975-1989 .....   | 40 |
| 16. Couverture possible des besoins en combustibles en 2000 et 2010 .....  | 40 |
| 17. Production et utilisation de l'électricité<br>Exemples de bilans annuels passés et possibles pour 2000 et 2010 ..... | 43 |



# PERSPECTIVES ÉNERGÉTIQUES À MOYEN ET LONG TERMES, À L'ÉCHELLE MONDIALE ET EN SUISSE

Prof. hon. EPFL dr André Gardel

## INTRODUCTION

Chacun connaît la place importante que l'énergie occupe dans notre vie de chaque jour.

Que ce soit au bureau, à l'atelier, à la maison, ou pour nous déplacer, nous y faisons constamment appel. Elle fait fonctionner les mille et un appareils, moteurs, installations, etc., qui facilitent notre vie, et surtout accroissent nos possibilités, notre potentiel d'action.

Pour maintenir une croissance économique, synonyme de prospérité et de plein emploi, nous consommons chaque année plus d'énergie. Et ne perdons pas de vue que la prospérité des pays industrialisés est une condition sine qua non pour qu'ils puissent apporter un appui au développement des pays pauvres.

Mais cette production croissante d'énormes quantités d'énergie, son transport et sa consommation ne vont pas sans soulever des problèmes nombreux et divers; ils peuvent porter des atteintes, parfois graves, à l'environnement.

*Il y a donc un équilibre à trouver entre la nécessaire sauvegarde d'une nature à laquelle nous tenons, et, d'autre part, l'efficacité et les commodités que nous procure l'énergie à travers ses innombrables usages.*

Nous devons donc nous demander si cette croissance de la consommation d'énergie va se poursuivre et si l'on disposera des ressources voulues pour y faire face. Les moyens à mettre en œuvre comportent-ils des dangers, et sont-ils susceptibles de porter à l'environnement des atteintes, que l'on doive considérer comme intolérables, pouvant à l'extrême mettre en péril l'humanité elle-même?

C'est cet avenir qu'il nous faut essayer de discerner. C'est un exercice ambitieux, mais peut-être pas aussi présomptueux qu'il paraît, car on peut mettre en évidence des tendances profondes et durables. Il est ainsi possible de situer, au moins approximativement, cet avenir et ses principaux problèmes, sans se perdre dans les innombrables détails ou éventualités au sein desquels l'homme de la rue est désorienté.

Commençons par noter que la Suisse, si importante à nos yeux, n'est qu'un tout petit élément de l'ensemble mondial:

- 1% de la population
- 2% du produit intérieur brut
- 3% de la consommation d'énergie.

*Ce n'est donc pas ce que nous ferons en Suisse, ou ne ferons pas, qui déterminera l'évolution mondiale. A l'inverse, ce qui se passera dans le reste du monde aura une influence directe sur la situation dans notre pays.*

Nous commencerons donc par une esquisse de cette évolution mondiale pour apprécier les problèmes essentiels qu'elle pourra poser et les solutions probables.

Cette esquisse, nous la tenterons à long terme – disons une cinquantaine d'années – ce qui devrait nous permettre de bien faire ressortir les questions majeures.

Puis nous en viendrons à la Suisse proprement dite. Partant de l'examen de la situation énergétique actuelle, nous tenterons d'estimer son évolution possible à moyen terme (10 à 20 ans). Il s'agira alors d'évaluer les besoins énergétiques probables, la façon dont ils pourraient être couverts, et les incidences économiques, voire politiques, des choix à disposition.

Il faut rappeler que, malgré le soin mis à bien évaluer les réponses données aux questions posées, il s'agit ici de prospective. La réalité de demain sera certainement différente de nos prévisions, et la seule certitude est celle de se tromper. Mais rien n'empêche de s'efforcer de ne se tromper que le moins possible.

Il n'en reste pas moins que «gouverner c'est prévoir». Ceux qui sont aux responsabilités ne peuvent donc agir qu'en ayant dans l'esprit une vision de l'avenir, vision qui ne doit être ni étroite ni figée; leurs décisions doivent être cohérentes avec cette vision. Cela est évidemment le cas dans tous les domaines; puisent les réflexions qui suivent être utiles dans celui de l'énergie.

*Remerciements: Dans la préparation de ce document, l'auteur a bénéficié, notamment dans la recherche des données numériques, de l'aide efficace de son ancien assistant à l'EPFL, le Dr ès sc. techn. Edgar Gnansounou, ing. EPFL, auquel il exprime ici sa gratitude. Sa reconnaissance va également aux secrétaires et aux dessinateurs mis obligamment à disposition par BG Bonnard & Gardel, ingénieurs-conseils S.A., qui ont bien voulu procéder à la mise au net de cette étude, avec dévouement et de manière particulièrement conscientieuse.*



## PREMIÈRE PARTIE

# PERSPECTIVES ÉNERGÉTIQUES À L'ÉCHELLE MONDIALE, À LONG TERME

## Chapitre 1

### CONSOMMATION MONDIALE D'ÉNERGIE ET ÉVOLUTION PROBABLE À LONG TERME

Précisons tout d'abord qu'il s'agira ici, au niveau mondial, d'**énergie primaire**, donc de celle qui est disponible dans l'environnement, pris au sens large, ou qui en est prélevée; ce peut être de l'énergie hydraulique (et non l'électricité qu'on en tire), de la chaleur qui se trouve potentiellement dans les combustibles fossiles, du rayonnement solaire reçu par des capteurs, etc. C'est en énergie primaire que sont établies les statistiques internationales. Il n'empêche que la définition même de ce qu'est l'énergie primaire est parfois discutable; cette question est abordée dans l'Annexe A.

A l'échelle mondiale, cette énergie primaire se calcule en **exajoules** (symbole: EJ). Un EJ est un milliard de milliards de joules ( $10^{18}$  J), le joule étant l'unité d'énergie du Système International (SI) de mesures, valable pour toutes les formes d'énergie: chaleur, électricité, travail mécanique, rayonnement, etc. (p.m. 1 J est la chaleur qu'il faut fournir à un litre d'eau pour éléver sa température de 1/4 °C environ; 1 J par seconde est une puissance de 1 watt).

#### § a) Situation actuelle

*En 1990, la consommation mondiale d'énergie avoisinera 300 EJ. A titre de comparaison, celle de la Suisse est d'environ 1 EJ par an.*

Les 3/4 de cette consommation sont le fait des **pays industrialisés** (230 EJ ou 77%), ceux-ci groupant un quart de la population mondiale (1,3 milliard d'habitants sur 5,2, soit 25%).

Note: Ces chiffres, et ceux qui suivent, sont arrondis; on trouvera en Annexe B la liste des pays constituant pour nous le Groupe A des pays industrialisés et les chiffres correspondants pour 1985, ainsi que les deux Groupes B (pays en voie d'industrialisation) et C (pays moins développés). Le tableau 1 donne en outre les chiffres relatifs à 1980 et 1975.

Le 1/5 de cette consommation (60 EJ) est dû aux pays en voie d'industrialisation (Amérique du Sud, Chine, Afrique du Nord), qui groupent près des 4/10 de la population mondiale (2,0 milliards d'habitants, soit 38%).

| GROUPE<br>Pays                               |                   | A<br>industri-<br>alisés | B<br>en voie d'indus-<br>trialisation |                    | C<br>moins<br>dévelop.<br>< 8 | Monde<br>totaux<br>ou<br>(moyen-<br>nes) |
|--|-------------------|--------------------------|---------------------------------------|--------------------|-------------------------------|--|
| 1. Consomm. d'énergie primaire par hab.      | GJ/hab,<br>1980   | > 50                     | 8 à 50                                | Chine<br>pop.seule | < 8                           |  |
| 2. POPULATION 1985                           | G.hab.            | 1,269                    | 1,862                                 | 1,060              | 1,706                         | 4,837                                    |
| 80   |                   | 1,223                    | 1,711                                 | 0,996              | 1,516                         | 4,450                                    |
| 75   |                   | 1,117                    | 1,567                                 | 0,933              | 1,332                         | 4,076                                    |
| 3. Répartition 1985                          | %                 | 26                       | 39                                    | 22                 | 35                            | 100                                      |
| 80   |                   | 27,5                     | 38,5                                  | 22                 | 34                            | 100                                      |
| 75   |                   | 29                       | 38                                    | 23                 | 33                            | 100                                      |
| 4. Accrois-<br>sem <sup>t</sup> annuel 75-80 | %<br>/an          | 0,74<br>0,77             | 1,71<br>1,77                          | 1,25<br>1,31       | 2,39<br>2,62                  | (1,68)<br>(1,78)                         |
| 5. ENERGIE PRIMAIRE CONSUMMEE 1985           | EJ<br>/an         | 214                      | 44                                    | 21                 | 10                            | 268                                      |
| 80   |                   | 207                      | 36                                    | 16                 | 7                             | 250                                      |
| 75   |                   | 186                      | 27                                    | 13                 | 5                             | 218                                      |
| 6. Répartition 1985                          | %                 | 80                       | 16                                    | 8                  | 4                             | 100                                      |
| 80   |                   | 83                       | 14                                    | 6                  | 3                             | 100                                      |
| 75   |                   | 85,3                     | 12,4                                  | 6                  | 2,3                           | 100                                      |
| 7. Accrois-<br>sem <sup>t</sup> annuel 75-80 | %<br>/an          | 0,67<br>2,16             | 4,10<br>5,92                          | 4,74<br>5,28       | 7,39<br>6,96                  | (1,40)<br>(2,78)                         |
| 8. ENERGIE PRIMAIRE par habitant 1985        | GJ/<br>hab.<br>an | 169,6<br>169,3           | 23,6<br>21,0                          | 19,6<br>16,3       | 5,9<br>4,6                    | (55,4)<br>(56,2)                         |
| 80   |                   | 158,0                    | 17,2                                  | 13,6               | 3,8                           | (53,5)                                   |
| 9. Accrois-<br>sem <sup>t</sup> annuel 75-80 | %<br>/an          | 0,05<br>1,38             | 2,35<br>4,08                          | 3,45<br>3,92       | 4,87<br>4,26                  | (-0,28)<br>(0,99)                        |
| 10. PNB Total 1985 répartition par habitant  | G.\$US<br>%       | 10090<br>83              | 1569<br>13                            | 236<br>2           | 514<br>4                      | 12173<br>100                             |
|  | \$/hab            | 7951                     | 842                                   | 223                | 301                           | 2517                                     |

Tableau 1

Population, énergie consommée, PIB, répartition par groupes de pays, évolution 1975-85  
(G.: giga =  $10^9$  ou milliards)

6% (15 EJ) est dû aux pays moins développés (Inde, Asie du Sud-Est, Afrique Noire, etc.) groupant également près de 4/10 de la population mondiale (1,9 milliards, soit 37%).

Il est particulièrement intéressant, et utile pour établir des projections dans l'avenir, de comparer les **consommations moyennes par habitant** d'un pays donné avec son niveau de vie, mesuré par exemple par son **produit intérieur brut (PIB)**, également par habitant.

Note: Quant au choix du PIB/hab. comme indicateur économique du niveau de vie, voir aussi le calcul du pouvoir d'achat par la Banque Mondiale, Annexe C.

Les consommations par habitant sont calculées en **gigajoules (GJ)**, c'est-à-dire en milliards de joules ( $10^9$  J).

La figure 2 montre ce qu'il en est en 1985 des 89 principaux pays (de plus de 5 millions d'habitants), dans une représentation utilisant des échelles logarithmiques.

Note: Avec ces échelles, il y a un même écart entre 1 et 10 qu'entre 10 et 100; une droite de pente 1,1 signifie alors que la consommation d'énergie progresse comme la puissance 1,1 du PIB: si le PIB augmente de 10%, la consommation croît de 11%.

Note: Sur cette figure 2, le PIB est calculé en dollars USA de 1985. Une modification de parité des monnaies provoque donc un déplacement horizontal entre les points. Mais une variation du seul dollar USA ne modifie que la position du point USA. Cependant, les écarts entre les points des différentes parties du graphique sont si grands (facteur de 10 à 100) que les variations de parité n'ont qu'une importance limitée. Le même graphique établi en 1975 et en 1980 ne montre que peu de différences et les conclusions qu'on en tire ne sont pas modifiées.

On remarque tout d'abord sur cette figure 2 qu'il y a un **énorme écart entre la situation des pays riches et celle des pays pauvres**, atteignant un facteur de 100 (voire 500 entre les USA et les pays les plus pauvres). Ainsi le milliard d'habitants des pays les plus industrialisés consomment en moyenne (et il y a de grandes variations au sein même de ce milliard) 50 fois plus d'énergie que le milliard d'habitants des pays les moins développés: environ 200 GJ/hab. contre 4 GJ/hab.

Note: Le calcul est fait en admettant que la consommation d'énergie par habitant est la mesure du degré d'industrialisation. Il ne s'agit donc pas des pays les plus riches ou les plus pauvres, ce qui se mesurerait par le PIB/hab. Ainsi la Suisse, faible consommatrice par habitant, ne fait-elle pas partie du milliard le plus industrialisé ... (quoiqu'elle se trouve presque à la limite). Mais un calcul séparant le milliard des habitants des pays les plus riches ne donne pas une image satisfaisante, certains pays, tels l'Arabie Saoudite, ayant un important PIB quoique étant peu industrialisés. Soulignons au surplus les grandes disparités à l'intérieur de quelques très grands pays (Chine populaire, Inde, URSS), disparités au sujet desquelles il n'existe pas d'éléments statistiques disponibles.

Particulièrement importante est la constatation qu'**il y a approximativement proportionnalité entre consommation et PIB**, proportionnalité que souligne la droite à  $45^\circ$  ( $R = 50 H$ ) qui traverse le graphique.

Les «étoiles», marquées A, B et C, correspondent chacune à l'un des 3 groupes entre lesquels nous avons décomposé la population mondiale (pays industrialisés, en voie d'industrialisation et moins développés). On observe que ces 3 «étoiles» A, B et C sont presque exactement alignées, et cela sur une diagonale de proportionnalité.

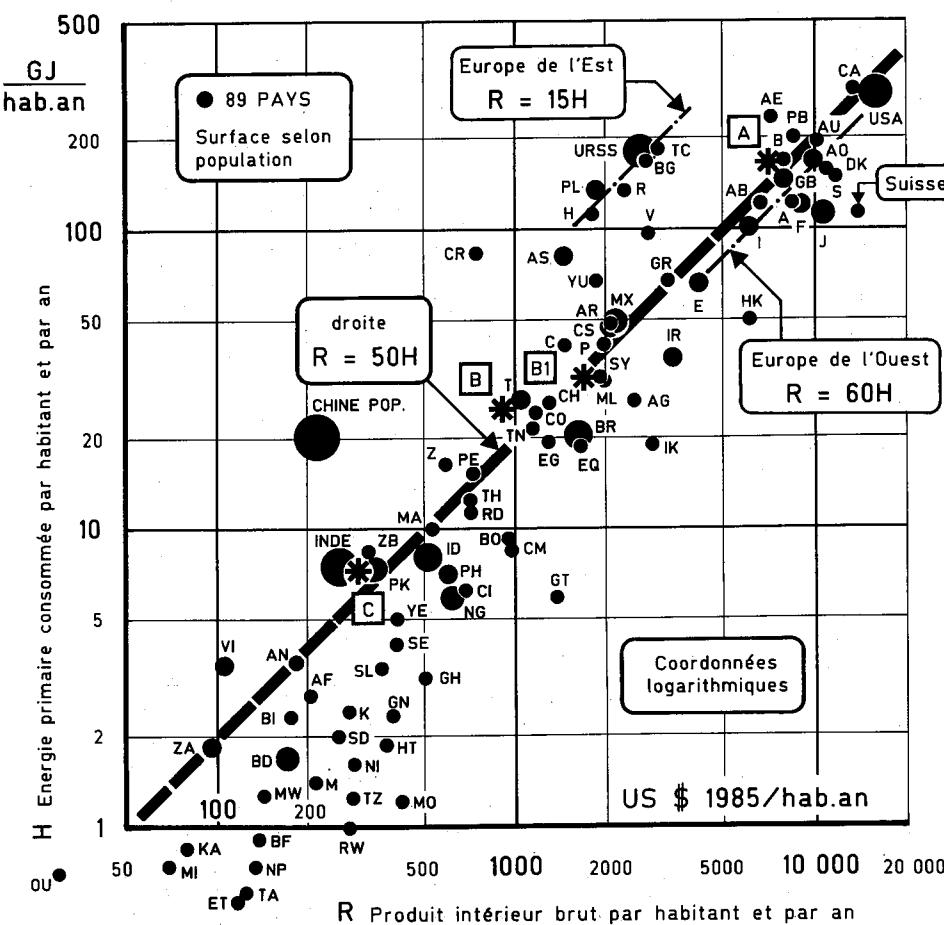


Fig. 2  
Corrélation  
«Produit intérieur brut  $R$  –  
Energie primaire consommée  $H$   
par habitant»  
(légende des noms:  
voir annexe B)

Certains considéreront peut-être que cette proportionnalité entre énergie consommée et niveau de vie est une évidence. Elle est cependant fortement contestée dans les milieux qui pensent que la croissance économique peut être maintenue et le niveau de vie amélioré sans augmentation de la consommation d'énergie. Il s'agit donc ici d'une question fondamentale dès lors que l'on s'apprête à faire des projections dans l'avenir (voir aussi Annexe C).

On peut poser la question en d'autres termes: *la situation actuelle des pays industrialisés préfigure-t-elle la situation qu'atteindront progressivement à l'avenir ceux qui sont aujourd'hui moins industrialisés?*

Un élément de la réponse peut être obtenu en suivant au fil des années l'évolution de quelques pays. Cela ne prouvera naturellement pas que la même évolution se poursuivra à l'avenir, mais cela fournira néanmoins une information utile.

Mais auparavant, il est sans doute intéressant de faire encore quelques commentaires à la figure 2:

- on remarque le net écart séparant les pays de l'Europe de l'Est de ceux de l'Europe de l'Ouest: à consommations par habitant égales, le PIB est 4 fois supérieur à l'Ouest. L'écart est encore plus élevé si l'on suppose que le rouble officiel était surévalué. Les événements récents paraissent confirmer la réalité de ce grand écart;
- la situation particulière de la Chine populaire, tout à fait en dehors des autres pays en voie d'industrialisation: la consommation d'énergie y est 4 fois plus élevée par habitant à PIB égal, si l'on suit une verticale sur le graphique; ou, si l'on suit une horizontale, le PIB est 4 fois plus faible à consommation d'énergie égale (ou toute combinaison des deux). La très grande population de la Chine lui donne beaucoup de poids dans les moyennes; c'est pourquoi, supposant que cet étonnant cas particulier peut provenir de la grande difficulté pour les autorités de ce pays à établir le PIB de manière analogue à ce qui est fait ailleurs, nous avons aussi calculé les valeurs moyennes du Groupe B sans la Chine, désignées par B1. Le point figuratif («étoile» B1) est alors aligné sur ceux des Groupes A et C;
- on note la position particulière de la Suisse: à PIB égal, on y consomme près de 2 fois moins d'énergie que dans le reste de l'Europe de l'Ouest, ce qui peut surprendre. Deux des causes en sont probablement d'une part le souci proverbial d'économie et de performance des Suisses, mais aussi d'autre part le fait que l'énergie comptabilisée en Suisse ne comprend pas celle (dite «grise») dépensée ailleurs dans la fabrication des produits importés (par exemple automobiles) ou l'extraction et le transport des combustibles. A ces deux causes s'ajoute l'effet d'une distorsion provenant de la valeur à prendre en compte pour l'électricité d'origine hydraulique et, surtout, nucléaire, dont il sera question un peu plus loin (voir Annexe A);
- la grande dispersion des points situés au bas du graphique tient sans doute au type d'économie des pays correspondants: une partie de l'énergie consommée échappe aux circuits commerciaux (bois

de feu, par exemple) de même que le calcul du PIB y est souvent incertain. On peut également supposer qu'une partie du PIB est obtenue par des activités n'entraînant que des dépenses d'énergie commerciale proportionnellement faibles (cultures par exemple).

Note: La consommation de 1 kg de bois par habitant et par jour, à 10 MJ/kg, conduit à 3,7 GJ/hab.an et suffit à décaler largement les points inférieurs vers le haut.

Revenons maintenant à la question, soulevée plus haut, de l'*évolution de quelques pays au cours du temps*.

Sur le graphique de la figure 3, nous avons reporté le PIB/hab. et l'énergie primaire utilisée par habitant en 1960, 1970, 1975, 1980, 1985, cela pour 12 pays industrialisés.

Note: Alors que dans la comparaison «PIB – énergie» de divers pays à un moment donné, donc pour une année déterminée, on se heurte à l'incertitude des taux de change à appliquer entre les monnaies nationales, une autre incertitude va apparaître, celle de la variation au fil du temps de la valeur réelle de la monnaie du pays considéré. On sait, par exemple, combien discutable est la définition d'un indice des prix à la consommation, utilisé pour calculer l'inflation. On doit en Suisse en réviser périodiquement la formation, et, en toute rigueur, on devrait le fixer différemment selon les catégories de consommateurs (le «panier de la ménagère» n'est pas le même selon le niveau des revenus).

A la difficulté mentionnée de connaître l'évolution de la valeur réelle de la monnaie d'un pays donné, s'ajoute sur cette figure l'effet des taux de change entre monnaies, puisque tout le graphique est établi en US\$ 1985. Or la parité des monnaies change d'une année à l'autre: le graphique établi en 1980 p. ex. ne serait pas identique pour les années 1960-1980. L'ensemble n'en reste pas moins significatif à nos yeux.

A part la Grande-Bretagne, on constate que la progression en conjoncture favorable, 1960-1975, s'est poursuivie de manière remarquablement parallèle à la «droite de proportionnalité» figurant à la figure 2. Pour la Turquie, le Portugal, l'Espagne et l'Italie, ce type de progression s'est même poursuivi au-delà, parfois jusqu'en 1985; ce sont les pays de l'Europe du Sud, moins avancés sur la voie de l'industrialisation.

Mais pour les pays plus industrialisés, un net changement apparaît vers 1973 (crise du pétrole): le PIB a dès lors progressé plus lentement et parfois sans accroissement notable de la consommation d'énergie, même pour certains avec un recul parfois temporaire de cette dernière.

Il semble évident que la volonté d'être moins dépendant du pétrole a conduit à des économies notables d'énergie primaire (lutte contre les gaspillages mais aussi utilisation plus rationnelle de l'énergie). Ce fait est particulièrement visible pour les USA (où les dépenses de produits pétroliers pour les transports étaient tout spécialement élevées).

Cependant, il faut relever que *ce changement provient pour une part d'une distorsion, quelquefois importante, due au mode de calcul de l'énergie primaire*

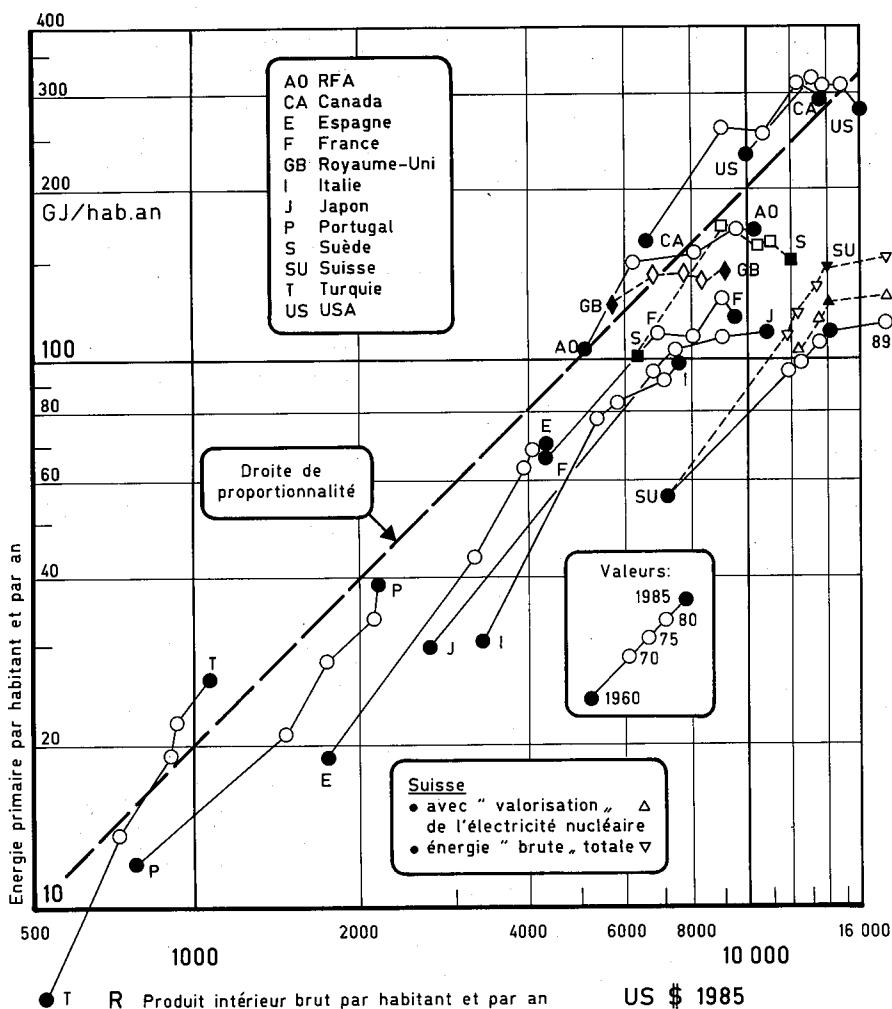


Fig. 3  
Corrélation «PIB –  
Energie primaire» par habitant

**consommée**, et il ne s'agit alors plus d'une véritable économie d'énergie. Cette distorsion vient de ce que dans de nombreuses statistiques l'énergie tirée de l'hydraulique et du nucléaire est simplement comptée pour l'électricité qu'on en tire. Pour l'hydraulique, la distorsion est limitée, le rendement global des installations correspondantes étant assez élevé, de l'ordre de 80%. Par contre, pour le nucléaire, l'erreur commise peut être importante: l'énergie dégagée l'est tout d'abord sous forme de chaleur, et la transformation en électricité se fait avec un rendement assez faible, de l'ordre de 35%. On ne prend donc en compte que le tiers environ de la chaleur dégagée, alors que si l'électricité est produite par des centrales thermiques à combustibles fossiles, c'est le pouvoir calorifique du combustible qui est pris en compte dans l'énergie primaire (alors que seul 40% est obtenu sous forme d'électricité).

Note: De fait, on ne sait pas comment définir l'énergie primaire d'un combustible nucléaire, car elle dépend du type de réacteur et du cycle de combustible qu'on prévoit d'utiliser; à l'extrême, il peut y avoir un facteur 50 d'écart selon qu'il s'agit ou non d'un surgénérateur (voir Annexes G et H).

La majeure partie de l'électricité produite dans le monde (environ 70%) l'est avec des centrales thermiques, dont une notable part utilisent des produits pétroliers. **Dès lors qu'on remplace cette production par des centrales nucléaires, l'énergie primaire comp-**

**tabilisée diminue d'un facteur 2,5 environ** (inverse du rendement de 40%) à électricité produite égale.

**On peut tenter de corriger cette distorsion, en multipliant l'électricité hydraulique et nucléaire par 2,5 dans le total de l'énergie primaire. On parle alors de «valorisation» de cette électricité. Cela revient à la compter comme si elle était produite dans des centrales thermiques (comme le reste de l'électricité).**

Sur la figure 3, nous avons indiqué ce qu'il en est si l'électricité est ainsi valorisée pour la Suisse. L'effet est d'autant plus marqué que le recours au nucléaire est important. S'il s'y ajoute une notable production hydraulique (cas de la Suisse), on obtient une correction encore plus marquée indiquée sur la figure 3. Aux USA, où une centaine de centrales nucléaires sont en service, la correction est actuellement de l'ordre de 20 GJ/hab.; elle pourrait être de 30 GJ/hab. en France (1989). Il en résulte que le changement de la progression dès 1975 n'est pas aussi marqué que ce que les statistiques internationales laissent supposer; il pourrait ne pas y avoir eu de diminution réelle entre 1980 et 1985 pour les deux pays cités.

Mais il n'en reste pas moins difficile de tirer des conclusions catégoriques de l'observation du passé récent, en vue de projections sur l'avenir. Il semble clair que dès 1975 une prise de conscience a eu lieu, dans de nombreux pays, de la nécessité d'être moins dépen-

dants du pétrole, et, d'une manière générale, d'être plus économies en énergie. Il s'y est ajouté en 1981 l'effet du 2<sup>e</sup> «choc pétrolier».

Il n'est donc pas absolument établi que l'évolution à venir suivra une simple loi de proportionnalité entre PIB et énergie consommée; on pourrait s'en écarter dans les pays les plus industrialisés, mais peut-être pas dans ceux qui le sont moins (Turquie, Portugal, par exemple, et à un moindre degré Espagne et Italie).

***Quoi qu'il en soit, la tendance générale, aussi bien quant à l'évolution dans le temps (1960-1985) qu'en ce qui concerne la position relative des divers pays, ne s'écarte de la proportionnalité «PIB-énergie» que de manière limitée ou temporaire.***

Soucieux de conserver une vue d'ensemble, il nous a paru intéressant de **déterminer la corrélation moyenne «PIB – énergie primaire» par groupe entier A, B ou C au cours des années récentes**. Malheureusement, il faut attendre plusieurs années avant de disposer de tous les chiffres au niveau international. Nous avons donc dû nous contenter d'examiner la période 1980-1985, en utilisant une seule monnaie pour le PIB, le dollar USA (donc avec les incertitudes sur les taux de change) et le prendre à sa valeur en 1980 (donc avec l'incertitude sur la valeur réelle en 1985 du dollar 1980). Néanmoins, l'indication obtenue est utile. On se souviendra toutefois qu'il s'agit d'une période trop courte pour être véritablement significative, et qu'elle a subi le coup de frein économique dû au 2<sup>e</sup> «choc pétrolier».

Ce qu'il convenait de déterminer est la pente de la droite joignant, en coordonnées logarithmiques, les états 1980 et 1985, cette pente étant l'exposant B de la relation  $R = A \cdot H^B$  où R est le PIB/hab. et H la consommation par habitant. S'il y a simple proportionnalité B = 1; le coefficient A dépend des unités (A = 50 sur le graphique de la figure 1). On trouve ainsi:

| Groupe     | A   | B   | A + B | C | A + B + C |
|------------|-----|-----|-------|---|-----------|
| Exposant B | 0,1 | 1,2 | 0,5   | 5 | 0,6       |

Il s'agit d'énergie primaire sans valorisation de l'électricité hydraulique et nucléaire. Cette correction peut être estimée, en particulier pour le nucléaire dont la production est connue. On obtient alors les valeurs suivantes très probablement plus significatives.

| Groupe     | A   | B   | A + B | C | A + B + C |
|------------|-----|-----|-------|---|-----------|
| Exposant B | 0,3 | 1,2 | 0,7   | 5 | 0,8       |

On constate donc qu'au niveau mondial global (A + B + C), l'exposant de 0,8 est peu inférieur à la simple proportionnalité (1,0), malgré l'effet du 2<sup>e</sup> «choc pétrolier»; l'exposant est encore relativement élevé, 0,7, pour la somme des pays industrialisés et en voie d'industrialisation (A + B) qui groupent le 96% du PIB mondial et le 97% de l'énergie consommée.

Note: Selon une déclaration de décembre 1990 du FMI, l'exposant de 0,6 pour l'ensemble de l'économie mondiale serait déjà remonté à 0,75 en 1990, donc voisin de 1 si l'électricité est valorisée.

L'exposant est cependant notablement différent d'un groupe à l'autre:

- très inférieur à la proportionnalité, 0,3, pour le groupe A des pays industrialisés;
- supérieur à la proportionnalité, 1,2, pour le groupe B des pays en voie d'industrialisation, ce qui souligne leur forte volonté de croissance;
- très élevé, 5, pour le groupe C, des pays moins développés, mais frappés sans doute par une grande incertitude sur les chiffres avancés par beaucoup des pays qui le constituent, et, ces chiffres étant très faibles, sans influence notable sur l'évolution mondiale globale.

Note: Pour mémoire: un exposant de 0,7 signifie que si le PIB/hab. croît de 10%, la consommation d'énergie primaire croît de 7%.

En ce qui concerne les populations des divers groupes et leur consommation d'énergie, le tableau 3 récapitule les données à disposition pour les années 1975, 1980 et 1985.

Si nous nous sommes étendus aussi longuement sur cette question de corrélation «PIB – énergie» c'est, rappelons-le, parce que l'existence de cette corrélation est fortement contestée dans certains milieux, notamment écologistes; sans s'opposer à la croissance économique, ils la voudraient sans augmentation de la consommation d'énergie (qui nécessairement soulève la question de la limite de ce qui peut, ou doit, être fait pour protéger l'environnement). Mais il nous semble que cette vision est essentiellement subjective, et que la démonstration n'est pas faite qu'elle peut être réaliste. Or il s'agit là d'une question fondamentale dès lors que l'on veut tenter une analyse prospective et essayer ainsi de mieux discerner les problèmes majeurs de l'avenir. On relèvera aussi que les calculs de la Banque Mondiale (Annexe C) font apparaître une augmentation de la consommation plus que proportionnelle à celle du pouvoir d'achat (exposant 1,3).

## § b) Evolution à venir de la consommation mondiale

Pour estimer ce que pourrait être cette consommation à moyen et long termes, nous devons nous demander:

1. *ce que pourraient être les niveaux de vie des populations concernées*
2. *quelle sera la relation à l'avenir entre niveau de vie et consommation d'énergie*
3. *et, enfin, ce que seront les effectifs de ces populations.*

Nous examinerons par la suite si les besoins ainsi évalués peuvent être couverts avec les ressources à disposition, compte tenu des aspects techniques (notamment développements industriels, protection de l'environnement) et financiers.

Dans un pays tel que la Suisse, l'un des plus riches du monde, il est aisément de se dire que le niveau de vie atteint est suffisant, et que pour l'avenir une incontestable priorité doit être donnée à la sauvegarde de la

nature. Maintenir le niveau de vie ne signifie naturellement pas stagner; les techniques progressent et la concurrence internationale oblige à faire l'effort nécessaire pour conserver la position acquise. Cela n'implique peut-être pas obligatoirement une croissance parallèle des besoins en énergie mais une incertitude demeure à cet égard.

Cependant, nombreux sont encore en Suisse ceux qui aspirent, à juste raison, à une amélioration de leur niveau de vie, ce qui ne peut qu'entraîner une élévation du niveau moyen des Suisses. Il ne faut pas non plus sous-estimer le dynamisme des entreprises; elles savent que celui qui n'avance pas recule.

Mais se contenter du niveau actuel n'est pas satisfaisant pour les pays industrialisés les moins favorisés; que l'on pense à l'Europe du Sud (p. ex. Portugal, Grèce, Turquie) dont le PIB/hab. n'atteint en gros que le 1/5 de celui des Suisses; que l'on pense aussi à l'Europe de l'Est, URSS comprise, où il est à peine supérieur à celui de l'Europe du Sud. Même aux USA où le PIB/hab. est voisin de celui de la Suisse, on sait qu'il existe une importante population qui vit au seuil de la misère.

**Dans tous ces pays industrialisés, les volontés des individus d'améliorer leur condition de vie, les volontés de développement des entreprises, et les volontés de progrès des collectivités publiques, se cumulent pour déterminer un processus extrêmement puissant de croissance économique.**

Il va de soi que les mêmes volontés s'exercent dans les pays en voie d'industrialisation, dont le PIB/hab. n'est en moyenne que le dixième de celui, moyen, des pays industrialisés. On ne sera donc pas étonné que les taux de croissance de ces pays soient ainsi supérieurs à ceux des pays industrialisés (voir tableau 1).

On relèvera enfin que dans presque tous les pays, une forte croissance économique est le principal espoir, parfois le seul, de résorber un dramatique chômage, fléau social s'il en est.

**Il paraît donc n'y avoir aucun doute quant au fait que tout sera fait, partout, pour que se maintienne une vigoureuse croissance, condition d'une amélioration du niveau de vie, notamment pour les moins favorisés.**

Qu'on nous permette d'insister fortement sur cette conclusion nette: elle va être déterminante quant à la consommation mondiale future d'énergie, que nous voulons estimer. Or **cette conclusion va à l'encontre d'une école de pensée qui a pris de l'importance ces dernières décennies**, plus particulièrement dans les pays hautement industrialisés. Qu'il s'agisse d'écologie, visant à la légitime sauvegarde de l'environnement, ou d'une crainte face à la rapidité de l'évolution technique et économique, voire d'une angoisse réelle de ne pas être en mesure de s'y adapter, d'être peut-être écrasé par le poids de très grandes entreprises présumées inhumaines, (à tort ou à raison), ou d'éviter l'emprise d'un matérialisme parfois outrancier, on doit bien constater qu'une partie non négligeable des populations de ces pays riches voudraient faire obstacle à la vigoureuse croissance que nous prédisons. Il ne s'agit nullement pour nous, ici, de porter un jugement de caractère moral, philosophique, sur le bien

ou le mal fondé des préoccupations conduisant à cette école de pensée; mais de rappeler cette vérité que l'on ne doit pas prendre ses désirs pour des réalités.

Pour notre part, nous entendons nous appuyer sur des faits établis et des tendances observées, et nous efforcer d'en tirer des conclusions correctes quant à l'avenir; il nous est indifférent que ces conclusions conviennent ou non à certains, que ceux-ci aient de très grands intérêts dans un secteur industriel ou un autre (industrie pétrolière, ou autre) ou que leur générosité ou leurs craintes leur fassent désirer un monde différent.

Sans tenter de chiffrer ces progressions du niveau de vie, (donc sans essayer de quantifier l'évolution du PIB/hab., avec les incertitudes dues aux monnaies et aux taux d'inflation, mais nous le ferons plus loin dans le cas particulier de la Suisse), nous passerons directement à la **deuxième question qui est celle de l'augmentation ainsi induite de la consommation d'énergie par habitant.**

Si, dans un **pays riche et industrialisé**, une élévation du niveau de vie moyen sans accroissement proportionnel de la consommation est concevable, il faut en mesurer les limites. Cela suppose en effet une amélioration parallèle des conditions d'utilisation de l'énergie à disposition, c'est-à-dire d'une part une volonté d'éliminer les gaspillages et d'autre part celle d'accroître les performances.

Par gaspillage, on entend des dépenses d'énergie sans amélioration réelle du niveau de vie, telles que chauffage excessif de locaux, déplacements inutiles de personnes ou de matières, éclairage superflu, etc.; ce sont des économies d'énergie qui ne coûtent rien, mais dont il ne faut pas trop attendre, car beaucoup a déjà été fait à cet égard, dès 1973.

L'amélioration des performances offre des possibilités notablement plus étendues, mais elle ne va pas sans investissements financiers. Le coût de l'énergie utile (chaleur, travail mécanique, etc., requis par l'utilisateur) va rapidement à augmenter. Encore faut-il que l'énergie investie dans le développement et la fabrication d'installations plus performantes ne dépasse pas l'économie d'énergie escomptée. C'est une vérification nécessaire et qui pourtant n'est, semble-t-il, que bien rarement faite (il faut aussi dire qu'elle est très difficile à conduire à terme).

Quoiqu'il en soit, cette possibilité d'amélioration significative des performances est réservée aux pays suffisamment riches, et elle exige généralement des délais notables.

On pourrait à cet égard prendre l'exemple du parc automobile suisse. La consommation spécifique (litres par 100 km à puissance égale) des voitures neuves a remarquablement diminué depuis 10 ans. Mais une dizaine d'années sont nécessaires jusqu'à ce qu'une part importante du parc de voitures ait été remplacé. Qui plus est, on constate que, en parallèle, la cylindrée moyenne des véhicules a augmenté, ainsi que leur nombre. La consommation de carburant n'a ainsi pas diminué en Suisse, mais augmenté d'environ 3% par an!

La situation est moins favorable dans les **pays peu**

**industrialisés:** ils ne sont généralement pas assez riches pour s'offrir des installations plus performantes, mais plus coûteuses aussi, de telle sorte que le service rendu est finalement plus onéreux.

Ces possibilités de croissance économique sans augmentation proportionnelle de la consommation, valables probablement lorsqu'il s'agit de variations modérées d'un niveau de vie déjà élevé, ne paraissent guère applicables lorsque l'on imagine des progressions importantes de ce niveau, par exemple sa multiplication par 2 ou 5 (on l'a vu plus haut dans le cas des pays du Sud de l'Europe, figure 3). On ne peut guère concevoir comment le niveau des pays en voie d'industrialisation pourrait passer à celui actuel des pays industrialisés, c'est-à-dire progresser d'un facteur 10 (en un délai sans doute long) sans que leur consommation d'énergie ne progresse fortement, peut-être même de plus de 10 fois (exposant de 1,2 pour le groupe B entre 1980 et 1985) (voir également l'Annexe C: exposant moyen mondial de 1,3). Cela reste évidemment difficile à apprécier ... et fait partie des incertitudes de la prospective. Ce que nous devons éviter est, répétons-le, de prendre notre désir pour la réalité probable (pensons à ce sujet au succès remporté il y a 15 à 20 ans par le Club de Rome lorsqu'il proposait l'ambition de la «croissance zéro»; nombreux sont ceux qui ont alors cru, au moins un temps, que la «croissance zéro» pouvait être un objectif raisonnable ...).

**En conclusion de cette deuxième question, il nous paraît clair, qu'à population mondiale constante, la consommation mondiale d'énergie continuera à croître fortement:**

– plus lentement dans les pays industrialisés, peut-être un peu moins que le PIB,

– plus rapidement dans les pays en voie d'industrialisation et peut-être plus que proportionnellement au PIB,

– rapidement dans les pays moins développés, mais sans que cela ait grande influence sur la consommation totale, étant donné leur très faible consommation par habitant.

Pour permettre l'évaluation de la consommation mondiale, ces conclusions doivent se traduire en une projection chiffrée, même si elle est inévitablement entachée de notables incertitudes.

La figure 4 indique **les consommations par habitant** que nous avons admises dans la suite du calcul (on trouvera en Annexe C le détail du calcul).

Pour les **pays industrialisés** (Groupe A), nous constatons que le taux annuel moyen d'augmentation a été de 0,7%/an de 1975 à 1985, période marquée par la fin de la récession due au 1<sup>er</sup> «choc pétrolier» et par le second choc, donc dans une conjoncture peu favorable. Nous maintiendrons néanmoins ce taux relativement faible de 1985 à 1990 pour tenir compte des observations présentées précédemment quant aux conséquences de la prise de conscience de la nécessité d'économiser l'énergie (et accessoirement de la distorsion provenant du mode de calcul des énergies hydraulique et nucléaire). La consommation en 1990 devrait donc être en moyenne un peu inférieure à 180 GJ/hab. par an.

Nous supposerons que ce taux de 0,7%/an va encore diminuer régulièrement à l'avenir, malgré les efforts visant au maintien d'une vigoureuse croissance économique, et ne pas dépasser 0,6%/an dès l'an 2000, et 0,5%/an dès 2020.

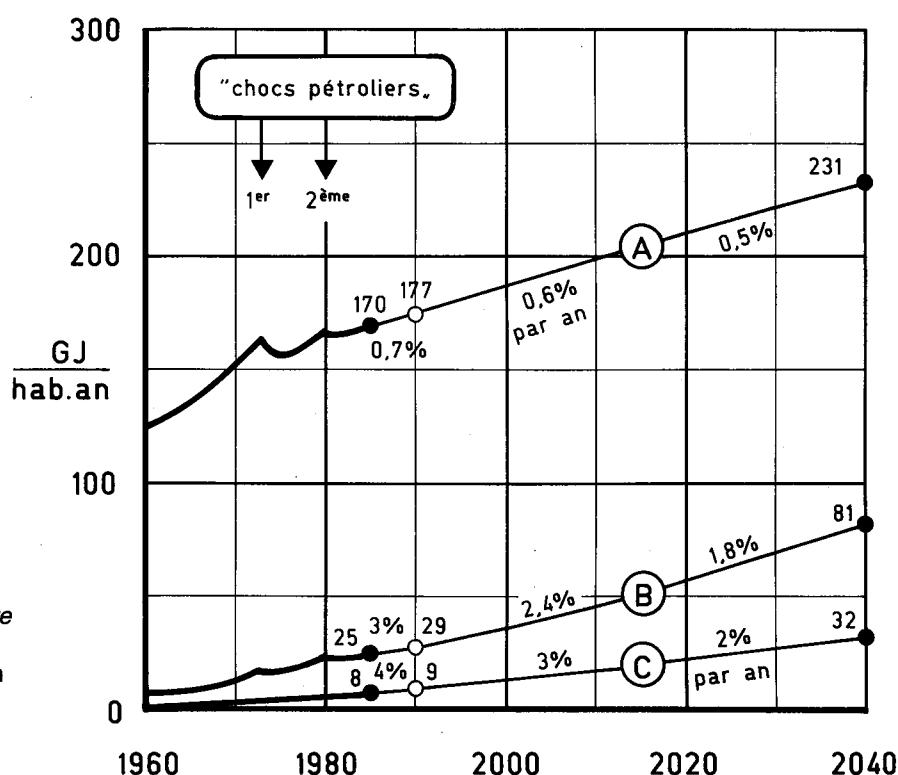


Fig. 4  
Evolution possible de la consommation d'énergie primaire par habitant, par an (électricité hydr. et nucléaire non «valorisée»)

Pour bien apprécier la modicité de ces taux, rappelons qu'il s'agit d'un taux moyen portant sur une population totale qui passe de 1,3 milliards d'habitants à 1,7 (vers 2040), dont une notable partie n'a encore qu'un niveau d'industrialisation limité (Europe du Sud et de l'Est, par exemple). Dans la mesure où les taux indiqués seraient dépassés dans ces régions (rattrapage), le taux devrait être encore plus faible dans les régions les plus industrialisées, donc voisin de 0 à 0,2%/an. Cela peut sembler bien modeste, voire improbable, mais notre propos n'est pas d'établir des chiffres élevés; au contraire, on verra que la prudence des chiffres utilisés n'enlèvera rien à la netteté de certaines conclusions.

**Avec l'évolution indiquée, la consommation par habitant atteindrait pour ce Groupe A 230 GJ/an dans une cinquantaine d'années.** Il s'agit d'un accroissement d'un tiers en un demi-siècle (antérieurement il a suffi de 20 ans, de 1960 à 1980, pour observer une même progression relative; on mesure ainsi la part faite ici aux préoccupations d'économie de l'énergie).

Ces précisions ont paru nécessaires car le Groupe A est actuellement le plus gros consommateur, comme déjà dit, et il importe de ne pas en surestimer le rôle à venir.

Passant maintenant au groupe, important, des **pays en voie d'industrialisation** (Groupe B), relevons tout d'abord que le taux moyen d'augmentation de la consommation par habitant a été de 3,3%/an durant la période 1975-1985, donc près de 5 fois plus élevé que dans les pays industrialisés. En admettant un taux de 3%/an pour 1985-1990, la consommation actuelle est probablement un peu inférieure à 30 GJ/hab. par an, donc 6 fois plus faible que dans le Groupe A.

Il paraît clair que le maintien d'un taux aussi élevé devient de plus en plus difficile au fur et à mesure que l'industrialisation progresse (la situation se rapproche lentement de celle du Groupe A).

Au surplus, cette progression est partiellement entravée (comme dans le passé) par l'augmentation rapide et parallèle de l'effectif des populations.

Nous avons donc admis que ce taux s'abaisserait à 2,4%/an dès l'an 2000, et à 1,8% dès 2020. Dès lors, la **consommation par habitant pourrait, dans ce Groupe B, atteindre 80 GJ/an dans une cinquantaine d'années**. Elle serait alors de près de la moitié de celle actuelle des pays industrialisés (ce qui paraît une progression possible en 50 ans).

On constate que dans **les pays moins développés** (Groupe C) le taux de croissance de la consommation par habitant a été appréciable de 1975 à 1985: 3,8%/an, donc supérieur au taux observé dans le Groupe B, et cela malgré une progression démographique plus élevée. Cela paraît s'expliquer par le simple fait que les niveaux de consommation sont très faibles, et qu'ils progressent donc rapidement dès qu'il y a croissance économique. On remarque d'ailleurs, qu'à l'inverse des Groupes A et B, le taux pour 1980-1985 est supérieur à celui de 1975-1980.

En admettant un taux de 4%/an pour la période 1985-1990, on peut estimer que la consommation par

habitant actuelle doit être voisine de 9 GJ/an dans ce groupe (un tiers de celle au sein du Groupe B).

Il semble très probable que ce taux de 4% va diminuer, lui aussi, à l'avenir, d'autant que c'est dans ce Groupe C que la progression démographique est la plus élevée. Nous avons donc admis qu'il ne dépasserait pas 3% dès l'an 2000 et 2% dès l'an 2020.

**Dans une cinquantaine d'années, la consommation par habitant dans ce Groupe C serait ainsi d'environ 30 GJ/an** (c'est le niveau actuel du Groupe B); elle ne serait encore (pour 4 milliards d'habitants) que le 1/7 de celle du Groupe A à ce moment-là.

Il reste à répondre à la **troisième question** posée plus haut: **quelle sera l'évolution de l'effectif des populations** dans ce laps de temps d'environ un demi-siècle. La réponse est ici un peu plus aisée car à l'échelle de groupes de pays aussi importants, les taux de croissance ne varient que lentement.

Alors même qu'il est notoire, de longue date, qu'il ne pourra y avoir de stabilité économique, et sans doute politique, que si l'humanité parvient à maîtriser sa croissance démographique, il faut bien constater qu'il est extrêmement difficile d'obtenir des changements dans ce domaine; on s'y heurte à de considérables obstacles: traditions ancestrales, positions religieuses, besoins économiques (p. ex. de nombreux enfants donnant une garantie pour la vieillesse), volonté de puissance de certains gouvernements. Il s'y ajoute l'effet des progrès de la médecine et de l'hygiène, qui diminuent la mortalité infantile et accroissent l'espérance de vie à la naissance (ce qui, à soi seul, suffit à accroître l'effectif des populations).

Quoique cette question sorte du cadre de la présente étude, **on ne saurait trop insister sur le fait que la croissance démographique mal contrôlée, pour ne pas dire généralement incontrôlée, est la source des plus grandes difficultés économiques, voire politiques**. Même faible dans les pays industrialisés, elle a pour effet que les postes de travail nouveaux créés chaque année par dizaines et centaines de milliers ne contribuent que peu ou pas à résorber le chômage; que dire dès lors de la quasi-explosion démographique dans les pays les plus démunis?

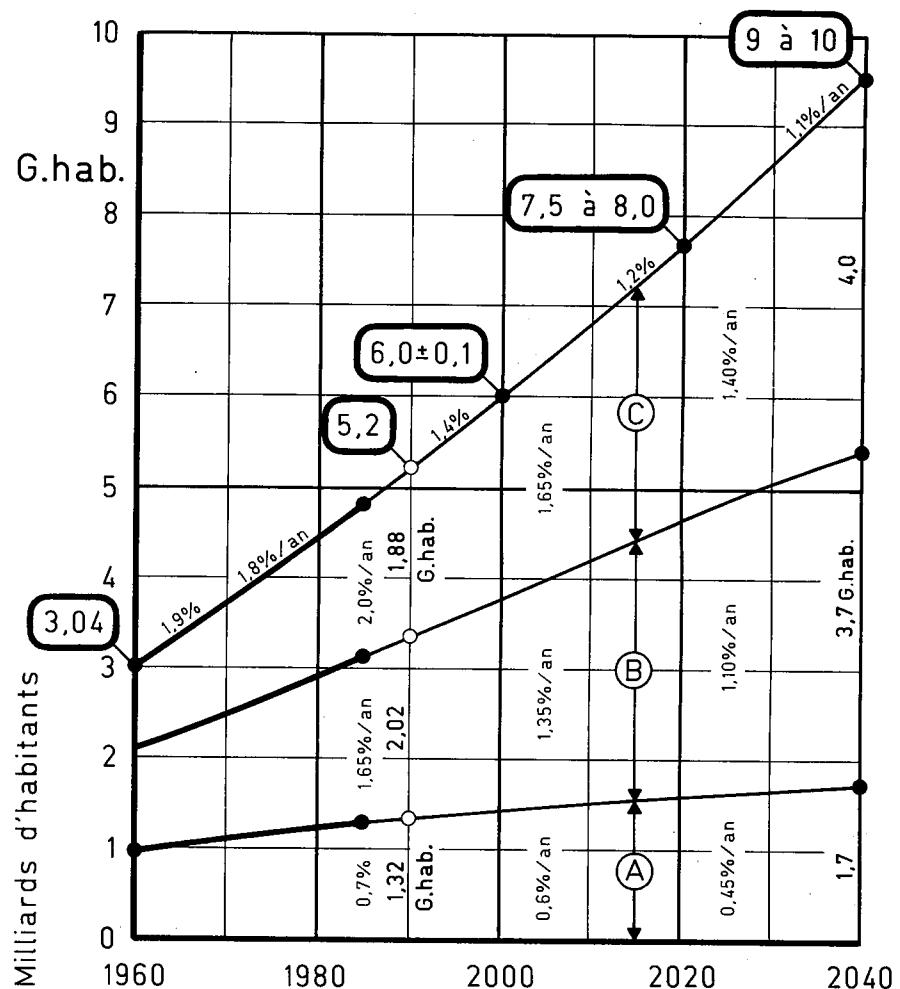
Les indications et estimations qui suivent sont précisées à l'Annexe D, et font l'objet de la figure 5.

Pour les **pays industrialisés** (Groupe A), le taux moyen de croissance des populations a été de 0,76%/an entre 1975 et 1985, en lente diminution. En admettant 0,71 % pour 1985-1990, la population de ce groupe est 1,32 G.hab. (milliards d'habitants) en 1990. En supposant que le taux s'abaisse à 0,6% dès l'an 2000 et à 0,45% dès 2020, **la population de ce groupe sera de 1,7 G.hab. vers 2040**.

Dans les **pays en voie d'industrialisation** (Groupe B) le taux moyen 1975-1985 a été de 1,74%, également en lente diminution (1,77% de 1975 à 1980, 1,71% de 1980 à 1985). Avec 1,65%/an de 1985 à 1990, la population de ce groupe est de 2,02 G.hab. aujourd'hui.

Si ce taux s'abaisse à 1,35%/an dès l'an 2000, et 1,10% dès 2020, **la population de ce groupe sera de 3,7 G.hab. dans un demi-siècle**.

Fig. 5  
*Evolution probable de la population mondiale*  
(G. hab.: milliards d'habitants)



Comme déjà mentionné, le taux de croissance est plus élevé dans les *pays moins développés* (Groupe C): 2,35%/an entre 1975 et 1985 (également en lente diminution). En le fixant à 2%/an de 1985 à 1990, la population du Groupe C doit avoisiner 1,88 G.hab. actuellement. Avec un taux inférieur à 1,65% dès l'an 2000, et 1,40% dès 2020, la *population totale de ces pays atteindrait 4,0 G.hab. vers 2040*.

La population terrestre totale s'établirait ainsi à 9,5 G.hab. en 2040.

Ces chiffres s'inscrivent dans les estimations faites ailleurs:

6,0 ± 0,1 G.hab. en 2000  
7,5 à 8,0 G.hab. en 2020  
9 à 10 G.hab. en 2040

Dès lors, et pour déterminer la consommation mondiale probable d'énergie primaire, il suffit de multiplier, pour chaque groupe, la population par la consommation admise par habitant, opération purement arithmétique, puis de totaliser pour les trois groupes A, B et C. Le détail du calcul est indiqué à l'Annexe D; le résultat fait l'objet de la figure 6. Cela conduit en chiffres arrondis:

300 EJ en 1990  
380 EJ en 2000  
580 EJ en 2020  
830 EJ en 2040

On doit donc s'attendre à une consommation mondiale totale de l'ordre de 800 EJ dans un demi-siècle, sans doute à 100 EJ près.

Ce total d'environ 800 EJ se répartirait comme suit:

|                                     |               |
|-------------------------------------|---------------|
| A. pays industrialisés              | 400 EJ        |
| B. pays en voie d'industrialisation | 300 EJ        |
| C. pays moins développés            | 100 EJ        |
| <b>Total</b>                        | <b>800 EJ</b> |

(Ce faisant, nous avons fait supporter au seul Groupe C la diminution de 830 à 800, la progression des pays moins développés paraissant la plus incertaine.)

L'évolution en 50 ans serait dès lors:

Groupe A: de 220 EJ à 400 EJ, soit + 180 EJ (augmentation de 4/5)

Groupe B: de 60 EJ à 300 EJ, soit + 240 EJ (augmentation de 4 à 5 fois)

Groupe C: de 20 EJ à 100, soit + 80 EJ (augmentation de 4 fois; arithmétiquement de 17 à 128, soit + 111 EJ augmentation de 6 à 7 fois)

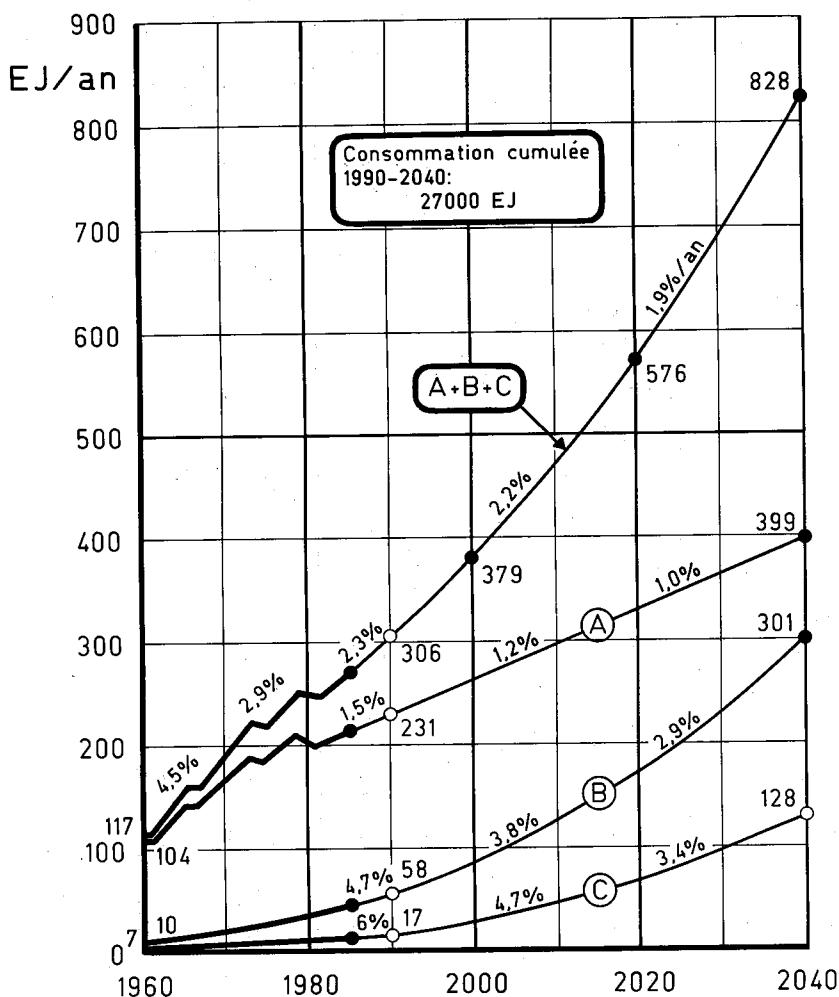


Fig. 6  
*Evolution possible de la consommation mondiale en énergie primaire*  
 EJ/an (électricité hydr. et nucl. non «valorisée»)  
 (Calculs: annexe D, tableau D1)

Il n'est pas sans intérêt de constater que *la plus forte augmentation*, en valeurs absolues et surtout en valeurs relatives, *est nettement le fait des pays en voie d'industrialisation* (Groupe B). Cela s'explique par leur niveau de vie actuel, relativement bas, donc qui peut assez aisément être accru, mais avec augmentation quasi proportionnelle de la consommation d'énergie comme souligné plus haut; ils sont déjà fortement engagés dans le processus de l'industrialisation ainsi que le prouve le taux de croissance (environ 3%/an) de la consommation d'énergie par habitant; et, de surcroît, leurs populations croissent rapidement (1,7%/an).

On peut d'autant moins imaginer de freiner ce processus qu'ils disposent eux-mêmes d'une part notable des ressources énergétiques (notamment en combustibles fossiles). Remarquons enfin que les pays industrialisés (Groupe A) se doivent d'aider au développement de ces pays, tant pour des raisons économiques (commerciales même) que politiques.

Une partie des mêmes observations vaut pour les pays moins développés, mais les conséquences sur la consommation mondiale restent limitées.

*Ainsi la moitié* (peut-être davantage) de *l'augmentation de la consommation mondiale d'énergie dans les 50 ans à venir sera due aux pays en voie d'industrialisation*; tous les efforts faits pour limiter la consommation dans les pays industrialisés (Groupe A) n'auront que peu ou pas d'effet à cet égard.

*La conclusion, essentielle, de cette partie de l'étude est donc que l'on doit s'attendre à la poursuite d'une forte augmentation de la consommation d'énergie au niveau mondial, multipliée par 2,5 à 3 d'ici 50 ans, due pour une part notable à l'évolution démographique, augmentation à laquelle il faut se préparer à devoir faire face et dont il apparaît illusoire d'espérer qu'elle ne se produira pas.*

Certains ont beaucoup de peine à accepter une telle idée. Ils ont le sentiment (car il ne s'agit pas du fruit d'une réflexion quantitative) qu'il n'est pas possible que population et consommation d'énergie continuent ainsi à croître fortement. Ils ont l'impression que l'on imagine ici des progressions exponentiel, impossibles en réalité car il y a des limites à tout. Or, les progressions proposées n'ont rien d'exponentiel: avec les diminutions progressives des taux annuels qui sont envisagées ici, ces taux seraient réduits à zéro peu après la fin du 21<sup>e</sup> siècle. La population terrestre pourrait alors atteindre 12 à 15 G.hab.; or, des études montrent que la planète est en mesure de nourrir des effectifs bien supérieurs ... et si performantes que puissent être les installations de l'an 2100, elles exigeront toujours 0,1 MJ pour éléver 1 tonne de matériaux de 10 m et 0,4 MJ pour porter 1 litre d'eau à ébullition.

Remarquons que le passage de 300 à 800 EJ en 50 ans correspond à un facteur d'augmentation de 2,7. Or ce facteur a été de 5 à 6 durant les 50 dernières

années (et probablement du même ordre de grandeur durant le demi-siècle antérieur). Et tout au long de ces années des voix se sont élevées, tenant le même langage: «de telles augmentations sont impossibles» et pourtant elles se sont réalisées.

*Nous ajouterons pour terminer, et cela nous semble fondamental, que l'on ne doit pas perdre de vue qu'économiser l'énergie n'est nullement un but en soi.* Quelle importance cela a-t-il, par exemple, que l'on consomme plus ou moins d'énergie solaire, alors que celle que l'on ne consomme pas est perdue? Les buts

sont la sauvegarde de l'environnement, qu'il s'agisse de ne pas vilipender des réserves d'hydrocarbures, nécessairement limitées, et de haute valeur quant à leur potentiel chimique, qu'il s'agisse de ne pas polluer les eaux ou l'atmosphère au point de modifier gravement et durablement le climat ou de perturber les conditions de vie par la dispersion de déchets nocifs, ou qu'il s'agisse enfin de la réalisation d'installations par trop dangereuses. Là sont les buts, et non dans la limitation de l'énergie consommée (il y a des cas dans lesquels on atteint mieux ces buts en dépensant plus d'énergie ...).

## Chapitre 2

### MODES DE COUVERTURE DES BESOINS MONDIAUX EN ÉNERGIE

L'ordre de grandeur de l'augmentation des besoins dans les 50 ans à venir étant évalué (500 EJ, éventuellement + 100 EJ), se pose la question de savoir s'ils pourront être couverts, et, le cas échéant, de quelles manières. (Notons que la consommation mondiale cumulée de 1990 à 2040 atteindra probablement 25 000 à 30 000 EJ).

A première vue, les possibilités sont innombrables, à commencer par les modes de production déjà largement développés, puis tous les procédés nouvellement explorés, et enfin ce qui sera découvert ou inventé dans ce délai relativement long.

Mais l'examen plus attentif, et surtout quantitatif, montre que seul un nombre limité de modes de production offre des possibilités à l'échelle des énormes besoins évoqués.

Actuellement, les 9/10 environ des besoins énergétiques mondiaux sont couverts par le recours aux combustibles fossiles (charbons, pétrole, gaz naturel), le dernier dixième l'étant par les énergies hydraulique et nucléaire. Les apports des autres sources, telles que énergies solaire, éolienne, géothermique, ou tirée des ordures et déchets, sans être nulles, sont négligeables à l'échelle qui nous intéresse ici (apport probablement inférieur à 1% au total).

Il est cependant possible que le bois de feu apporte davantage, mais il échappe pour une grande part aux circuits commerciaux et aucune statistique n'existe à notre connaissance à son sujet (une partie des arbres abattus fournissent du bois pour la construction, une partie ne sert qu'à engrasser temporairement le sol); un apport de 1% (3 EJ) correspondrait à l'utilisation en bois de feu de 20 à 100 millions de grands arbres par an, ce qui paraît beaucoup.

Qu'en est-il des réserves et ressources existantes pour les principales sources mentionnées.

#### § a) Combustibles fossiles

Tous combustibles fossiles confondus, les réserves mondiales (prouvées) sont évaluées à 30 000 EJ

(100 ans au niveau de consommation actuelle). On peut y ajouter ce que l'on désigne généralement par les «ressources», c'est-à-dire les réserves probables inférées des connaissances géologiques à disposition, mais non prouvées; ces ressources sont estimées à 250 000 EJ, donc à 8 fois le total des réserves prouvées.

Entre les 3/4 et les 4/5 de ces réserves ou ressources sont constituées par les *charbons*, le reste se répartissant par moitié entre pétrole et gaz naturel.

Nous n'entrerons pas ici dans le détail des problèmes d'extraction, transport ou utilisation que pose chacun de ces combustibles. Chacun sait que la plus grande commodité de l'emploi du *pétrole* et de ses sous-produits lui a permis de prendre une place importante, de l'ordre des 4/10 de la consommation mondiale d'énergie. Il en résulte que les réserves de pétrole correspondent à une quarantaine d'années de consommation au niveau actuel. Mais ce délai ne tend pas à se raccourcir malgré l'accroissement de la consommation de pétrole, au contraire; les découvertes résultant des efforts de prospection ont maintenu les réserves au niveau de la consommation de plusieurs décennies. Seul le coût a augmenté suite au développement de l'extraction off-shore ou en zone arctique.

La situation est, en gros, semblable en ce qui concerne le *gaz naturel*, et cela malgré le fait que la consommation de ce dernier progresse plus rapidement que celle du pétrole. Il y a cependant des raisons de penser que les ressources en gaz sont très supérieures à celles estimées.

Compte tenu d'autre part de l'amélioration en cours des procédés d'utilisation des charbons et des énormes ressources existant pour ce combustible, une conclusion évidente s'impose: *dans le délai d'une cinquantaine d'années que nous étudions ici, il n'y a pas de risque de manquer de combustibles fossiles, même si l'on continue à y faire appel pour couvrir une très large proportion (p. ex. 9/10) des besoins.*

*Ce n'est pas à ce niveau qu'un problème se pose, mais, comme chacun sait, ce sont les produits de la*

**combustion qui font l'objet de préoccupations croissantes du fait des graves modifications climatiques qu'ils pourraient provoquer, préoccupations moins marquées toutefois en ce qui concerne le gaz pour les charbons ou le pétrole.**

Avant de les examiner de manière plus précise, indiquons encore ce qu'il en est des réserves à disposition pour les deux autres sources d'énergie notables: hydraulique et nucléaire.

### § b) Energie hydraulique

Le potentiel hydro-électrique de l'ensemble de la planète a fait l'objet de diverses estimations, qui se situent dans la fourchette de 50 à 100 EJ/an, ce qui n'est nullement négligeable. Une dizaine d'EJ/an sont exploités actuellement. Malheureusement la majeure partie du reste se situe dans des régions peu accessibles et où les consommateurs font défaut. Et le transport de l'électricité sur de longues distances (p. ex. quelques milliers de km) est très onéreux. **On doit donc douter que l'hydraulique apporte plus d'une vingtaine d'EJ/an** sur les 500 que nous cherchons.

### § c) Energie nucléaire

En ce qui concerne le nucléaire, il existe certes de très grands gisements d'uranium, mais généralement à faible teneur. Aux conditions actuelles du marché, et en se limitant à l'utilisation dans des **réacteurs thermiques** (fission par neutrons lents, dits «thermiques», par opposition à la fission par neutrons rapides dans les **surgénérateurs**) les réserves paraissent être en mesure de produire environ 5000 EJ (100 à 200 ans au niveau de consommation actuelle). Il faut noter à cet égard que l'uranium proprement dit ne constitue qu'une faible part du coût du kWh produit (moins de 1 ct/kWh); or le doublement du prix de l'uranium rend accessible des gisements à plus faible teneur, triplant environ le potentiel énergétique à disposition.

Mais on sait que les réacteurs thermiques recourent principalement à la fission de l'isotope 235 de l'uranium, qui ne constitue que le 0,7% de l'uranium naturel. Le développement, en cours, des **réacteurs sur-générateurs** devrait permettre d'utiliser l'isotope 238 qui forme les 99,3% restants. Pratiquement, le potentiel énergétique à disposition serait multiplié par environ 50 (et atteindrait 200 000 à 500 000 EJ) si le parc des centrales nucléaires comprend 1/4 à 1/3 de **surgénérateurs** (voir Annexe E). **L'énergie nucléaire est donc en mesure d'assurer la couverture de l'accroissement des besoins mondiaux en énergie, sous réserve bien entendu de solutions satisfaisantes aux questions de sûreté de fonctionnement et de gestion des déchets.**

Il résulte clairement de ce qui précède que si l'on fait abstraction des risques de modifications climatiques que peut entraîner un large emploi des combustibles fossiles, ces derniers suffisent à eux seuls à assurer la couverture des besoins mondiaux en énergie durant le prochain demi-siècle, et au-delà. Il devient ainsi indispensable de correctement estimer dès à présent l'ampleur de ces risques.

De manière analogue, l'énergie nucléaire, avec utilisation de **surgénérateurs**, suffit, également à elle seule, à assurer cette même couverture. Et il est donc également nécessaire d'apprécier correctement les risques inhérents à un large emploi de cette énergie.

Nous procéderons donc dans la suite de cet exposé à une analyse de ces deux types de risques. Néanmoins, nous pouvons dès à présent évaluer s'il existe d'autres sources d'énergie, notables à l'échelle mondiale qui nous intéresse ici, et qui ne présenteraient pas des risques semblables.

### § d) Autres énergies

Il s'agit en premier lieu de l'énergie solaire, car on peut, toujours à cette échelle, écarter immédiatement les autres alternatives connues: énergie éolienne ou géothermique, énergies tirées des végétaux, des ordures et des déchets, ou des mers (vagues, marées, chaleur). Les possibilités offertes, bien réelles, ne sont pas d'un ordre de grandeur qui puisse retenir notre attention: il paraît établi que **toutes ensemble elles ne pourraient apporter que quelques EJ/an** (très probablement moins de 5 à 10 EJ/an).

Nous ne parlerons pas ici de **l'hydrogène**, qui ne constitue pas une source d'énergie primaire, mais, comme l'électricité, une forme intermédiaire entre énergie primaire et énergie utile. Cela ne signifie pas que l'emploi de l'hydrogène n'ait pas d'avenir à nos yeux, quoique la généralisation de son usage n'ira probablement pas sans soulever de sérieux problèmes. Mais, répétons-le, il ne s'agit pas d'une source d'énergie à disposition pour assurer la couverture des besoins futurs probables de l'humanité.

Certains parlent de **chaleur tirée de l'environnement** comme d'une source à prendre également en compte. Mais il ne s'agit en fait que d'une meilleure valorisation d'une énergie de haute qualité (dont il faut disposer, telle que électricité ou énergie mécanique) pour la transformer en une plus grande quantité d'énergie de basse qualité, le supplément d'énergie ainsi dégagé étant effectivement pris dans l'environnement. Parler de la chaleur tirée de l'environnement comme d'une source d'énergie primaire, susceptible de contribuer à la couverture des besoins, est en quelque sorte «jouer sur les mots» (voir Annexe G, § 3.B.).

### § e) Energie solaire

Revenons donc à l'énergie solaire (puis nous évoquerons les possibilités de nouvelles sources non encore disponibles, telle la fusion, ou à découvrir).

Le recours à l'énergie solaire est évidemment très séduisant à première vue: elle est abondante et gratuite (à vrai dire, toutes les énergies primaires sont gratuites avant prélèvement dans l'environnement: charbon, pétrole, uranium encore dans leurs gisements).

**Mais elle présente certaines particularités, qui sont autant de défauts notables:**

– **sa densité spatiale (W/m<sup>2</sup>) est faible, ce qui fait qu'il**

**faut de très grandes surfaces de captage pour disposer de puissances appréciables**

- **sa répartition temporelle n'est pas favorable (seulement de jour, et surtout en été, alors que les besoins existent aussi la nuit, et surtout en hiver, influence de la nébulosité)**
- **elle fournit de la chaleur ou de l'électricité et l'on ne sait stocker ni l'une ni l'autre à grande échelle**
- **elle est chère, surtout sous forme d'électricité.**

Il résulte de ce qui précède que si l'on peut envisager d'y recourir dans des cas particuliers limités (fourniture d'eau chaude domestique pour des villas ou de petits locatifs, climatisation de locaux de moyenne importance, alimentation en électricité de sites isolés), elle ne permet pas d'assurer la couverture d'une partie significative des besoins à l'échelle d'un pays.

**Quelques exemples permettront de mieux mesurer les limites de l'énergie solaire.**

1. Pour produire 10% seulement de la consommation actuelle de la Suisse en électricité, il faudrait couvrir de capteurs photovoltaïques une surface égale à celle d'une autoroute à 4 voies allant de Berne à Varsovie (hypothèse: 1000 km d'autoroute à 20 m<sup>2</sup> de large. Energie annuelle captée: 5 GJ/an/m<sup>2</sup>. Rendement en électricité: 20%. Production annuelle: env. 5 TWh sur 49 consommés par an).
2. L'utilisation par des centrales à héliostats de tous les terrains convenant dans l'ensemble du Valais (au-dessus de la limite des arbres) fournirait annuellement 1/10 environ de l'électricité produite par une unique centrale nucléaire.
3. On construit actuellement dans le Jura suisse, au Mont-Soleil, la plus grande centrale solaire d'Europe, d'une puissance de 500 kW; elle couvrira la surface de 3 à 4 terrains de football. La plus grande centrale solaire au monde (aux USA) est 80 fois plus puissante (40 MW); sa production annuelle d'électricité est de l'ordre de 100 millions de kWh, soit 2% de celle de la centrale nucléaire de Leibstadt. Ainsi, pour remplacer une nouvelle grande centrale nucléaire en Suisse, il faudrait construire environ 10 000 centrales solaires de la taille de celle du Mont-Soleil (fournissant de l'électricité 5 à 10 fois plus chère).
4. Si, dans une vue délibérément très futuriste, on imaginait que tous les pays d'Europe (URSS comprise) se groupent pour réaliser dans le Nord-Sahara des installations solaires, utilisées à l'électrolyse d'eau pompée dans la nappe, et que l'hydrogène soit ensuite amené en Europe et distribué à l'instar du gaz naturel, et que ces installations couvrent **seulement 10% de la seule augmentation des besoins énergétiques de l'Europe** au cours des 50 prochaines années (soit environ 5 EJ/an), ces installations s'étendraient sur environ 10 000 000 000 de m<sup>2</sup> (dont 40% de capteurs). L'investissement total (pompage d'eau, captage solaire, électrolyse, stockage, transport et distribution de l'hydrogène) se situerait vraisemblablement à l'ordre de 10 à 30 mille milliards de francs, et fournit en Europe un combustible, l'hydrogène, à un

prix 10 à 20 fois plus élevé que ceux actuellement pratiqués.

Sans doute matériellement irréalisable dans ce délai, et comportant de toute évidence un énorme risque politique, ce serait de surcroît insupportable économiquement. Et il resterait à couvrir les 90% restants.

**Si décevante que soit la conclusion des exemples qui précédent, il faut se rendre à cette évidence que l'énergie solaire n'est pas en mesure d'apporter une contribution significative à la couverture des besoins futurs en énergie.**

## § f) Apparition et développement de nouvelles sources d'énergie

Apparaîtra-t-il de nouvelles sources d'énergie dans le délai d'une cinquantaine d'années que nous examinons ici? Il est naturellement impossible de l'affirmer, mais à coup sûr y aura-t-il des découvertes ou des inventions, dont certaines pourraient être appelées à jouer un grand rôle dans le futur (nous ne parlons pas ici de la fusion nucléaire, connue depuis plus de 50 ans, qui offre de grandes possibilités, et sur laquelle nous reviendrons).

**Partant de l'idée que tel pourrait être le cas, il faut se demander quelle durée est nécessaire pour qu'une telle nouvelle voie parvienne à jouer un rôle significatif dans la couverture des besoins; par «significatif», nous entendons: de l'ordre de 10 à 20%, à défaut de quoi, ce rôle restera marginal.**

Pour l'apprécier, on peut décomposer le processus en 4 étapes principales.

Dans une **première étape**, il s'agit de passer de petites expériences, confirmées, à une grosse installation de laboratoire, capable de fonctionner de manière continue et contrôlée et dégageant des quantités macroskopiques d'énergie. Selon la nature et l'ampleur des obstacles rencontrés cette étape peut avoir une durée très variable, mais pour le moins quelques années: le coût de la dite grosse installation peut atteindre 100 Mfr. (millions de francs) et cela ne se réalise pas en un jour, ni sans de nombreuses recherches et vérifications préalables. Pour la fission atomique, il y a fallu 4 ans (1938-1942), mais cette étape a bénéficié de l'effort de guerre en cours, et l'on ne saurait prétendre que la pile atomique construite à Chicago par Fermi (pile qui a divergé le 2.12.42) réponde entièrement à la définition qui précède. Pour la fusion nucléaire, après 50 ans d'efforts et des investissements totaux à l'échelle de plusieurs milliards de francs, cette première étape n'est pas encore franchie (encore qu'elle soit près de l'être, sans doute d'ici quelques années). Cette apparente lenteur peut surprendre étant donné l'intérêt évident qu'il y a à progresser rapidement: tous les problèmes ne sont pas connus à l'origine; il faut les résoudre un à un pour avancer. On peut aussi remarquer que 1 milliard de francs correspond en gros à 10 millions d'heures de travail (ouvriers et spécialistes confondus), soit environ 5000 hommes-années (p. ex. 500 personnes en moyenne pendant 10 ans).

On entre alors dans une **deuxième étape** qui consiste à passer de la grosse installation de laboratoire, maîtrisée, à une véritable centrale prototype, de faible ou moyenne puissance (p. ex. 10 à 50 MW), qui doit pouvoir fonctionner en continu (24 h sur 24), et offrir les garanties voulues quant au contrôle de sa marche, à sa sûreté de fonctionnement et à ses éventuels effets sur l'environnement; en d'autres termes, elle doit permettre une exploitation normale. Son coût sera à nouveau de plusieurs centaines de millions de francs; il faut le temps de la projeter, de la construire, et de l'exploiter 2 à 3 ans par exemple. Pour la fission atomique (bénéficiant toujours d'un important effort militaire), il a fallu 14 ans (1942-1956: centrales de Shippingport USA et Calder Hall UK).

Dès lors, la **troisième étape** peut être abordée, qui consiste à passer à de premières grandes centrales commerciales (500 à 1000 MW); celles-ci, outre des garanties accrues de sécurité et de régularité de fonctionnement, doivent être en mesure de fournir de l'énergie à un prix acceptable pour l'économie et prendre leur place dans le système d'approvisionnement d'un pays. Le coût d'une telle centrale est de plusieurs milliards de francs. Il va de soi que pour consentir une aussi importante dépense, les investisseurs exigeront des garanties raisonnables de succès, entraînant des compléments d'études. Il faut dès lors compter avec une dizaine d'années pour franchir cette étape, si tout va pour le mieux. Pour la fission atomique, il s'est écoulé environ 15 ans (1956-1970).

Reste la **quatrième étape**, qui est la multiplication de ces grandes centrales commerciales, en nombre tel qu'elles prennent à la couverture des besoins la part significative déjà évoquée. Avec la fission, et après 20 ans (1970-1990), on a mis en service environ 450 de ces installations; leur puissance électrique totale atteignait il y a un an 320 000 MW et leur production annuelle (à 7000 h/an en moyenne) est de 8 EJ. En «valorisant» cette électricité par un facteur 2,5, il s'agit donc de l'équivalent de 20 EJ d'énergie primaire (chaleur, comparable à celle des combustibles fossiles économisés), donc environ 7% de l'énergie mondiale consommée.

**Pour la fission**, qui a bénéficié rappelons-le d'efforts particuliers au début, l'*ensemble du parcours a ainsi duré 50 ans* (1940-1990). Peut-être faut-il souligner que l'on n'est pas ici en présence de développements portant sur de très petites unités (p. ex. microprocesseurs), pour lesquels on peut assez rapidement passer à des fabrications automatisées, en très grandes séries. Néanmoins, et à titre de comparaison, il a aussi fallu une cinquantaine d'années pour arriver à produire les grands ordinateurs actuels.

**La conclusion de cette analyse est que si de nouvelles découvertes interviennent ces prochaines années (et pourquoi pas?), elles ne seront, selon toute probabilité, pas en mesure de modifier sensiblement la question de la couverture des besoins énergétiques mondiaux dans une cinquantaine d'années.**

Pour le moins, on ne saurait y compter. Le problème est donc de savoir si l'on parviendra à assurer cette couverture, et comment, sans l'hypothétique apport,

sans doute marginal, de possibilités entièrement nouvelles.

### § g) Fusion nucléaire

Pourachever ce tour d'horizon des moyens à disposition, il faut encore apprécier ce que, dans ce délai, la fusion nucléaire peut apporter.

Le «combustible» essentiel de la fusion (c'est-à-dire la matière dont il faut disposer et que l'on va consommer, sans qu'il y ait aucune combustion au sens chimique du terme) est une variété d'hydrogène, lourd, dit deutérium. Son premier intérêt est d'être abondant dans la nature, quoique très dilué: il constitue 0,02% de l'hydrogène, donc environ 0,002% de l'eau; il y en a ainsi plus de 10 000 milliards de tonnes.

En utilisant 0,1 % du deutérium existant dans l'eau des mers (ce qui est insignifiant) on obtiendrait une énergie de plus de 300 000 000 EJ (1 million d'années au niveau de la consommation mondiale actuelle). Autant dire que pour nous il s'agit d'une réserve inépuisable d'énergie, et cela d'autant que son extraction n'est pas particulièrement onéreuse. On voit ainsi que la mise au point de centrales à fusion résoudrait, définitivement, à vues humaines, le problème de l'approvisionnement énergétique de la population terrestre, et l'on comprend que des efforts de plus en plus importants soient faits pour y parvenir.

Cependant, si cette fusion est la principale source d'énergie des étoiles, et c'est elle qui est mise à contribution dans la bombe H, sa production contrôlée n'a, à ce jour, pas encore pu être réalisée en laboratoire. La fusion de deux noyaux de deutérium est obtenue s'ils se heurtent à très haute vitesse, ce qui correspond à des températures de l'ordre de 100 millions de degrés (en fait mélange deutérium et tritium).

Il faut donc parvenir à chauffer une certaine quantité de deutérium, gazeux, à cette température et l'y maintenir un temps suffisant pour que se dégage une quantité macroscopique d'énergie de fusion. Cela n'est pas aisé, mais l'on est près d'y parvenir, notamment dans l'installation JET (Joint European Torus) en Grande-Bretagne. D'autres centres mondiaux y travaillent activement et l'on peut tenir pour très probable que cette première étape sera franchie avant l'an 2000, si ce n'est avec JET du moins avec l'installation suivante, déjà en projet avancé.

Le franchissement de la deuxième étape n'ira cependant pas sans soulever ses propres difficultés. Si la fusion ne produit pas de déchets analogues à ceux de la fission, dont certains hautement radioactifs, elle dégage toutefois des quantités importantes de tritium, variété «hyperlourde» d'hydrogène, qui est radioactif; sa durée de demi-vie, 11 ans, fait qu'il faut plusieurs décennies (p. ex. 100 ans) pour que sa radioactivité soit fortement diminuée (facteur 1000), et le fait qu'il s'agit d'hydrogène, du point de vue chimique, le rend susceptible de former avec de l'oxygène une eau «tritiée» pouvant contaminer un élément essentiel de l'environnement; le risque est accentué par le fait que l'hydrogène est un gaz très léger, qui diffuse aisément; de grandes précautions d'étanchéité seront donc nécessaires. Il s'y ajoute le manque d'expérience

disponible quant au comportement des matériaux soumis aux champs magnétiques très élevés utilisés.

En supposant, avec un probable optimisme, que la première étape sera franchie vers 1995-2000, et la seconde vers 2010-2015, peut-être y aura-t-il une première grande centrale commerciale à fusion en service vers 2020-2030. Il pourrait y en avoir 100 en service (nécessité faisant loi) vers 2040. Leur production annuelle d'énergie atteindrait alors 10 EJ environ (à 3000 à 5000 MW par centrale). Ce n'est certes pas négligeable, mais sans signification décisive sur les 500 EJ supplémentaires que nous cherchons dans ce délai.

*Si avancé que soit aujourd'hui le développement de la fusion nucléaire, force est d'admettre qu'il est peu probable qu'elle joue déjà un rôle déterminant dans l'approvisionnement énergétique dans 50 ans. Il n'en reste pas moins qu'il s'agit peut-être là de la source principale d'énergie de la fin du 21<sup>e</sup> siècle, disposant de réserves pratiquement illimitées, et ne portant pas atteinte à l'environnement (pas de contribution à l'effet de serre), à condition que soit dûment maîtrisée la sécurité de fonctionnement, en particulier le confinement du tritium.*

### § h) Conclusion quant aux possibilités de couvrir les besoins énergétiques mondiaux vers 2040

*Arrivé à ce stade de nos réflexions, il est possible de faire le point comme suit:*

1. *A l'échelle mondiale, il semble très probable que les besoins totaux en énergie primaire auront passé de 300 EJ/an aujourd'hui à environ 800 EJ/an dans 50 ans.*
2. *Seules deux sources d'énergie sont en mesure de couvrir l'accroissement de l'ordre de 500 EJ/an, tant par l'état actuel de leur développement technique, que par le coût de l'énergie qu'elles délivrent et par les réserves et ressources à disposition: les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire de fission. Aucune des autres sources, notamment hydraulique, solaire ou fusion, ne pourra dans ce délai jouer un rôle autre que marginal.*
3. *Un recours massif aux combustibles fossiles ou à l'énergie de fission soulève d'incontestables et sérieux problèmes quant aux conséquences climatiques ou à la sûreté (fonctionnement, déchets); c'est à un examen plus précis de ces problèmes que nous allons nous attacher dans ce qui suit.*

## Chapitre 3

# CONSÉQUENCES ET DANGERS DE L'UTILISATION DES COMBUSTIBLES FOSSILES ET DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

### § a) Utilisation des combustibles fossiles

Les divers combustibles fossiles (charbons, pétrole, gaz naturel) ne sont pas formés de composants chimiques identiques, et les produits de leurs combustions sont en partie différents, de même que les effets sur l'environnement. Nous ne pouvons donc pas continuer à les considérer globalement, ainsi que cela a été le cas jusqu'ici.

D'autre part, ces effets sur l'environnement sont de plusieurs natures (pollution de l'air, effet de serre, protection contre les ultra-violets), que l'on doit distinguer. Ajoutons qu'il s'agit de phénomènes souvent complexes, parfois encore mal connus, ce qui impose une certaine prudence dans les conclusions. Nous devrons donc nous efforcer de clairement séparer ce qui est bien établi, et ce qui est présomptions. Au surplus, les indications qui suivent ne seront pas exhaustives.

Le carbone étant présent en quantités importantes dans tous ces combustibles, et son oxydation dégagent la majeure partie de l'énergie recherchée, leur utilisation produit dénormes quantités de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> (gaz carbonique), de l'ordre de 25 milliards de tonnes en 1990 (env. 20 000 milliards de m<sup>3</sup>). Il n'y a pas moyen de le retenir et il est intégralement rejeté dans l'atmosphère; il s'y dilue et il est impossible de l'y récupérer. **Le phénomène est donc irréversible et il entraîne des conséquences catastrophiques pour l'environnement.**

*ble et cela doit être fortement souligné; si on laisse le phénomène se développer à un point qui ferait apparaître des conséquences intolérables, il n'y aura aucune possibilité de revenir en arrière.*

Le taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est surveillé depuis près d'un siècle. Quoique très faible (il se mesure en parties par million en volume, ppm), il augmente très régulièrement. S'il a été, semble-t-il, de 200 ppm il y a 20 000 ans, il a augmenté depuis un siècle (ère industrielle) de 280 ppm à un peu plus de 350 aujourd'hui. Les molécules de CO<sub>2</sub> existant dans l'atmosphère ne sont évidemment pas marquées selon leur origine (naturelles ou activités humaines) et il existe un important cycle naturel du CO<sub>2</sub>, (mort des plantes libérant du CO<sub>2</sub>, absorption de CO<sub>2</sub> par photosynthèse, etc.). Mais ce que l'on observe est que l'accroissement de la teneur de l'air en CO<sub>2</sub> évolue, depuis près d'un demi-siècle, de manière exactement parallèle avec celui de l'utilisation des combustibles fossiles. 50 à 60% du CO<sub>2</sub> dégagé par les activités humaines suffit à expliquer l'augmentation observée dans l'air. Compte tenu de ce qui est absorbé par les végétaux et par le plancton à la surface des mers, il apparaît donc hautement probable (quasi-certain) que l'augmentation en cours du taux de CO<sub>2</sub> est due à l'utilisation des combustibles fossiles. Ce taux croît de plus en plus rapidement (tout comme la consommation en combustibles); de 0,6 ppm par an vers 1960, il a passé à 1,3 ppm vers 1970 et se situe actuellement à près de 2 ppm/an.

L'augmentation du taux paraît s'être ralentie; ce qui s'explique aisément par le passage progressif d'une consommation faite essentiellement de charbon (80% vers 1940-1950) à un recours accru au pétrole (50% vers 1970), puis au gaz naturel (1985: environ 35% charbon, 40% pétrole, 25% gaz).

La teneur en carbone va en diminuant par unité de masse (présence croissante d'hydrogène dans les hydrocarbures), tandis que le pouvoir calorifique croît (en gros 30 MJ/kg pour le charbon, 45 pour le pétrole, 50 pour le gaz, l'hydrogène étant un meilleur combustible que le charbon: carbone pur 34 MJ/kg, hydrogène pur 142 MJ/kg). Il est donc incontestable qu'à énergie dégagée égale, l'emploi du gaz naturel réduit la production de CO<sub>2</sub> par rapport au charbon ou au pétrole (comme le soulignent les distributeurs de gaz).

*On peut donc tenir comme fort probable que si l'on continue à faire essentiellement appel aux combustibles fossiles pour couvrir les besoins durant les 50 prochaines années, l'augmentation annuelle de la teneur de l'air en CO<sub>2</sub> passera d'environ 2 ppm/an à 5 ppm/an. La concentration en CO<sub>2</sub> augmenterait alors de 350 ppm (1990) à environ 500 ppm (2040), cela en supposant que l'aptitude des végétaux à absorber une part du CO<sub>2</sub> émis ne diminue pas (déforestation?), ni l'absorption à la surface des mers.*

Une telle augmentation n'irait pas sans conséquence importante sur la température moyenne de l'air au voisinage du sol, cela par suite de l'accroissement de l'effet de serre.

Rappelons que si certaines substances nous paraissent transparentes, c'est qu'elles laissent passer la lumière visible (zone relativement étroite du spectre des ondes électromagnétiques). Mais ces mêmes substances peuvent être plus ou moins opaques pour d'autres rayonnements, calorifique par exemple (infrarouge basse fréquence). Ainsi en est-il du verre de nos fenêtres: la lumière naturelle les traverse, mais la déperdition de chaleur des locaux est limitée (notamment avec certains verres spéciaux). L'atmosphère de la planète joue un rôle analogue: elle laisse passer environ 50% du rayonnement solaire, qui atteint ainsi les basses couches de l'atmosphère et le sol, qu'il chauffe.

Cependant, pour que la température moyenne y soit stable, il faut que la planète réémette exactement la même énergie; c'est l'équilibre radiatif. L'atmosphère étant peu transparente pour le rayonnement calorifique, la température au voisinage du sol doit s'élèver suffisamment, à 15°C en moyenne (288 K), pour que l'équilibre soit réalisé (si l'atmosphère était transparente au rayonnement calorifique, la température qui régnerait à la surface de la planète serait bien inférieure à 0°C). Cette relative opacité de l'air au rayonnement calorifique provient de divers gaz, présents dans l'atmosphère, mais certains seulement en très faibles quantités. Citons les CFC (chlorofluoro-carbones), de nos réfrigérateurs, 20 000 fois plus absorbants que le CO<sub>2</sub>, les oxydes d'azote qui le sont 200 fois plus que le CO<sub>2</sub>, le méthane (composant principal du gaz naturel) qui l'est 20 fois plus, et même la vapeur d'eau l'est davantage.

Mais du fait des teneurs différentes de l'air en ces

différents gaz à effet de serre, le CO<sub>2</sub> à lui seul provoque la moitié du réchauffement, tandis que les parts des autres sont de l'ordre de 15 à 20% pour le méthane (marais, fumier), 20% pour les CFC (sprays, etc.) et seulement 5% pour les oxydes d'azote. On aura remarqué que si l'utilisation du gaz naturel dégage moins de CO<sub>2</sub>, à énergie égale, que les autres combustibles fossiles, sa combustion libère par contre le maximum de vapeur d'eau, qui vient s'ajouter au cycle naturel de l'eau; il est aussi très important que le système de distribution du gaz n'ait pas de fuites, puisque le méthane augmente beaucoup l'effet de serre (on a calculé que des fuites de 1% pour l'ensemble du système suffisent à enlever, à cet égard, tout avantage à l'emploi du gaz naturel; mais il n'existe aucune indication précise au sujet de ces fuites, qui dans d'anciens réseaux pourraient être notables).

*L'effet de serre est donc un phénomène physique bien établi (connu depuis près de 2 siècles). Il en est de même de son accroissement si l'air en vient à contenir davantage des gaz énumérés ci-dessus.*

Ce qui est beaucoup plus difficile à établir, donc est moins certain, ce sont la nature et l'ampleur des conséquences. Les gaz rejetés par les activités humaines s'incorporent dans les cycles naturels, interfèrent avec de nombreux autres phénomènes (p. ex. si la température s'élève, les échanges thermiques avec les mers sont modifiés, les surfaces enneigées diminuent et l'albédo terrestre change, ou l'évapotranspiration des végétaux s'accroît, etc.). De très gros programmes de calcul ont été mis sur pied ces dernières années pour tenter de simuler l'évolution climatique probable en tenant compte des principales interactions (p. ex. décomposition de l'atmosphère en éléments de 500 x 500 km de base et 20 couches superposées dans l'air et dans les eaux, évolution par pas de 1 an sur 50 ans, et contrôles par simulation du passé); ces programmes sont à la limite des possibilités des plus grands ordinateurs disponibles, (qui peuvent exiger une semaine pour une simulation!). Les résultats obtenus varient selon les hypothèses admises par les principaux centres de recherches (deux aux USA, un en UK), mais il paraît y avoir convergence sur le changement principal: la température moyenne de l'air au voisinage du sol s'élèverait de 2 à 5°C, davantage en zone polaire (10°C?). Certaines régions, à l'échelle continentale, verraien la sécheresse s'installer (désertification), tandis que la pluviométrie augmenterait fortement ailleurs, avec un profond changement du régime des eaux. Il se pourrait que le niveau des mers s'élève (1 à 2 m?) par fonte des glaces polaires, mais cet aspect est controversé.

La question se pose de savoir si les récentes années plus chaudes (les 4 plus chaudes du siècle dans les derniers 10 ans, 1988 étant la plus chaude) sont de premières manifestations de cette évolution, ou s'il s'agit simplement d'écart statistiquement explicables (ou même si c'est la conséquence d'une variation temporaire de l'activité du Soleil).

Les auteurs de ces programmes disent qu'il leur faudra encore une dizaine d'années avant de parvenir à des conclusions claires et quantitativement convaincantes. *Neanmoins, il semble bien que l'on en sache déjà suf-*

*tisamment pour admettre que faire appel principalement aux combustibles fossiles pour couvrir l'accroissement des besoins en énergie dans les 50 ans à venir a de fortes chances de provoquer de graves changements climatiques, à l'échelle planétaire, même si l'ampleur et la nature précise de ces changements sont encore marquées d'une notable marge d'incertitude.* Un demi-siècle est un délai court s'il faut faire face à des modifications radicales des cultures, à une forte diminution de l'eau disponible alors que l'effectif des populations croît, à des déplacements de populations à l'échelle de dizaines, plus probablement de centaines, de millions de personnes (sans parler d'énormes travaux portuaires si le niveau des mers s'élève, ou si le débit des cours d'eau est profondément modifié, etc.).

**Rappelons que la gravité des questions soulevées est fortement accentuée par le fait qu'il s'agirait de changements irréversibles. Il ne peut donc pas être question pour réagir d'attendre de voir si les changements ont bien lieu; ce serait alors trop tard.**

On doit remarquer qu'un emploi abusif des combustibles fossiles porte aussi atteinte à l'environnement autrement que par l'effet de serre. Ces combustibles contiennent du soufre, en quantités variables, qui, s'il n'est pas retenu avant combustion (p. ex. lors du raffinage) dégage des oxydes ( $\text{SO}_2$ , puis  $\text{SO}_3$ ) auxquels les êtres vivants sont sensibles, en particulier les végétaux, et provoquent des pluies acides ( $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$  donne  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , acide sulfurique); c'est, semble-t-il, l'une des causes du dépérissement des forêts (elles-mêmes indispensables à l'élimination d'une partie du  $\text{CO}_2$  par photosynthèse). Par ailleurs, si la température de combustion s'élève (p. ex. pour améliorer les rendements), il y a production accrue d'oxyde d'azote, qui contribue à la destruction de l'ozone des hautes couches de l'atmosphère, ozone qui nous protège du rayonnement solaire ultraviolet (d'où un risque accru de cancers de la peau, semble-t-il déjà constaté); mais il paraît s'agir ici d'une question soulevée plus récemment à l'égard de laquelle on manque encore de données suffisantes. Il se peut aussi que les particules très fines provenant des stériles du charbon jouent un rôle dans la nébulosité (de même que les masses de poussières libérées par l'activité volcanique, telle l'explosion du Mont St Helen).

**Or, les combustibles fossiles jouent un rôle si considérable dans l'économie mondiale actuelle qu'en stabiliser la consommation, par exemple au niveau actuel de près de 300 EJ/an, ne manquera pas d'être extrêmement difficile.**

Il y faudra une volonté politique d'une fermeté exceptionnelle, et qui tarde à se manifester, alors même que les conséquences de l'effet de serre sont soulignées depuis plus de 10 ans.

**Et stabiliser cette consommation au niveau actuel n'empêchera pas le taux de  $\text{CO}_2$  dans l'air de continuer à croître, à près de 2 ppm par an.** Mais cela ralentirait fortement l'évolution que l'on doit craindre et donnerait plus de temps pour s'adapter aux changements (on passerait de 350 ppm en 1990 à 500 ppm en 70 ou 80 ans, ou peut-être davantage, au lieu de 50 ans).

**En conclusion, il n'est donc pas possible d'affirmer**

*catégoriquement aujourd'hui que les graves changements climatiques évoqués plus haut se produiront avec la nature et l'ampleur indiquées si l'on recourt essentiellement aux combustibles fossiles pour faire face à l'accroissement des besoins énergétiques prévisibles dans les 50 prochaines années. Mais les études approfondies en cours conduisent à penser que cela est hautement probable, et il est clair que si l'évolution se fait comme supposé, elle ne fera que se poursuivre et s'accentuer dans les décennies qui suivront.*

Il est ainsi totalement irresponsable de se borner à éluder la question, et il est impératif d'examiner s'il existe une possibilité de limiter, voire restreindre le recours à ces combustibles, et, le cas échéant, à quel prix.

Nous avons établi plus haut que la seule autre source d'énergie à l'échelle des besoins est, dans le délai considéré, l'énergie nucléaire de fission. Il nous faut donc examiner maintenant les risques qu'elle fait courrir, puis apprécier s'ils sont ou non acceptables face aux risques provenant des combustibles fossiles.

## § b) Dangers de l'énergie nucléaire

Avant d'examiner si les risques liés à un large emploi de l'énergie de fission peuvent être réduits au point d'être acceptables, il convient de vérifier que cette forme d'énergie est en mesure de couvrir les énormes besoins définis plus haut. Il résulte en effet des réflexions faites au sujet des combustibles fossiles que l'on pourrait se trouver dans la situation de ne pouvoir faire appel à ces derniers que de manière très modérée, voire d'en diminuer l'usage audessous du niveau actuel. Autrement dit, le nucléaire peut-il couvrir une majeure partie de l'accroissement de consommation de 500 EJ/an, attendu de 1990 à 2040. Il s'agirait par exemple de couvrir 400 EJ/an de plus en 2040, le solde de 100 EJ/an provenant de l'hydraulique (20 EJ d'électricité valorisée ici à 50 EJ), du solaire (30 EJ?), des autres sources alternatives et peut-être déjà de la fusion (20 EJ?).

400 EJ d'énergie primaire annuelle correspondent à la production d'environ 4000 centrales (fonctionnant 7000 h par an) de la taille des centrales électriques actuelles de 1200 à 1500 MW.

**La production nucléaire thermique actuelle étant d'environ 20 EJ/an, il s'agirait donc de la multiplier par 20 en 50 ans, ce qui correspond à un taux annuel moyen d'augmentation de 6%; initialement cela supposerait la mise en service de 15 centrales par an, pour le monde entier, ce qui est manifestement réalisable** (le taux moyen a été de 15%/an de 1975 à 1980, et de l'ordre de 12% /an de 1980 à 1990; 50 nouvelles centrales ont été mises en service depuis Tchernobyl en 1986).

**La question est plutôt de savoir si l'énergie ainsi produite est susceptible de remplacer les combustibles fossiles dans la grande diversité de leurs emplois.**

Il n'y a évidemment aucun problème pour ce qui est de la production d'électricité (dont actuellement les 2/3 l'est par des centrales thermiques). Pour ce qui est de la chaleur industrielle ou de chauffage de locaux,

le recours au nucléaire exigera d'une part le développement de réseaux de distribution de chaleur (il en existe déjà), ce qui, de surcroît permet de mieux valoriser l'énergie nucléaire, et, d'autre part, la mise au point de petits réacteurs de chauffage (10 à 50 MW p. ex.) décentralisés (déjà à l'étude). L'utilisation de l'électricité permettrait par ailleurs de disposer de chaleur à haute température (p. ex. 1000°C) lorsque c'est nécessaire.

**C'est pour les transports que les modifications semblent devoir être les plus notables.** Pour les distances moyennes, le chemin de fer à grande vitesse prend déjà le relai de l'avion et l'évolution se poursuivra de toute manière étant donné la saturation prévisible du trafic aérien. Si pour les grandes distances, on devait en rester au mode actuel de propulsion des avions, une partie des produits pétroliers devrait leur être réservée, quitte à ce que la production nucléaire réduise ailleurs le recours au pétrole.

Il ne fait pas de doute que le trafic routier continuera à augmenter. Si l'on peut concevoir un déplacement partiel du trafic marchandise vers le rail, on doit s'attendre à devoir réserver une partie des produits pétroliers aux voitures. Sans doute l'automobile électrique va-t-elle se perfectionner notablement, mais la question reste ouverte de savoir si elle parviendra à supplanter le moteur à explosion dans une mesure importante; le cas échéant, la consommation d'électricité croîtra dans la mesure où celle de carburant diminuera.

Un autre aspect de la question est le fait qu'il faudra alors réserver une partie des combustibles fossiles, encore utilisés, au profit des pays moins développés, pour lesquels la technique nucléaire restera d'un accès plus difficile (investissements élevés, technologie avancée). Par voie de conséquence, les pays industrialisés devront réduire encore plus leur appel aux combustibles.

**On imagine sans peine qu'au-delà des questions proprement techniques, d'enormes intérêts politico-économiques et financiers vont entrer en jeu.** Les grandes réserves de pétrole ou de gaz perdront de leur intérêt, et l'on peut s'attendre à de fortes résistances à une telle évolution, si justifiée qu'elle puisse être par ailleurs.

Il ne faut d'ailleurs pas s'y tromper: **ces intérêts sont déjà à l'œuvre maintenant** et il n'y a pas lieu d'en être surpris. Ils jouent leur rôle dans la controverse anti-nucléaire actuelle, de même que dans la contestation de la gravité des conséquences climatiques possibles suite à l'emploi des combustibles fossiles.

**Toutes les installations mettant en jeu de grandes quantités d'énergie comportent des dangers liés aux énormes potentiels présents** (p. ex. incendies ou explosions de grands réservoirs de gaz ou de produits pétroliers, pollutions marines, ruptures de barrages). **L'énergie nucléaire ne fait pas exception, le danger provenant essentiellement du caractère radioactif des produits présents et pouvant être disséminés en cas d'accident, et des effets différés que ces produits sont susceptibles d'induire.** Il est clair que si l'on devait se résoudre à faire à l'avenir un très large appel à cette forme d'énergie, ces dangers devraient faire l'objet

d'un examen particulièrement attentif. L'appréciation des risques est en outre rendue difficile, paradoxalement, du fait du nombre limité d'accidents qui se sont produits (même si l'un, Tchernobyl, a été très grave); difficile aussi parce qu'on manque de recul pour évaluer correctement les conséquences à long terme; difficile enfin du fait que la radioactivité, quoique omniprésente à faibles doses, est perçue dans les populations comme un danger nouveau et alarmant (et que l'information à ce sujet est déficiente, ce qui laisse la place à une désinformation étendue).

Notre propos sera donc de répertorier ces dangers, de tenter d'en mesurer l'ampleur, puis, si possible, de les relativiser (ce qui ne signifie pas les sous-estimer) par rapport à d'autres risques connus et acceptés (à tort ou à raison).

**On doit distinguer les dangers existants même en fonctionnement normal d'une centrale nucléaire, de ceux résultant d'un dysfonctionnement accidentel, éventuellement grave.**

**En fonctionnement normal**, une installation nucléaire ne doit porter aucune atteinte à l'environnement autre que la production de déchets, dont certains sont hautement radioactifs, et qu'il va falloir traiter et stocker, donc gérer de manière que le danger qu'ils représentent soit acceptable. Nous y reviendrons. Les effluents, liquides ou gazeux, doivent être filtrés et contrôlés s'ils contiennent des substances chimiquement nocives ou radioactives. La radioactivité à laquelle peut être exposé le personnel de l'installation doit être exactement contrôlée et rester inférieure à des normes fixées avec grande prudence. A fortiori, la population avoisinante doit-elle être à l'abri de toute atteinte.

**Ce qui est fondamental dans ce qui précède est que, hormis la question importante de la gestion des déchets radioactifs, rien n'empêche de fixer des exigences aussi élevées qu'on le désire, de telle sorte que l'environnement soit protégé à complète satisfaction. Il n'en est pas du tout de même avec les installations utilisant des combustibles fossiles pour lesquelles le fonctionnement normal entraîne le rejet des gaz de combustion dans l'atmosphère, avec les inévitables et probablement très graves conséquences qui ont été mentionnées plus haut (effet de serre, ozone, etc.).**

Venons-en au risque **d'accident de fonctionnement**.

Il va de soi que des défaillances matérielles ou humaines se produisent dans les centrales nucléaires (la perfection n'étant pas de ce monde). Mais il faut que leurs conséquences restent limitées (dégâts matériels), ne portent qu'exceptionnellement préjudice au personnel de l'exploitation, et, surtout, qu'elles n'entraînent en aucun cas un danger d'irradiation anormal de la population avoisinante ou de contamination des sols et des végétaux.

**Or, et comme pour le fonctionnement normal, rien n'empêche d'exiger des dispositions qui garantissent cette limitation des conséquences.** Certes, le coût de l'installation, et celui de la formation de son personnel, s'en trouvent accrus; mais l'incidence sur le coût de l'énergie produite reste supportable, voire faible (p. ex.

1 milliard de francs supplémentaires, investis à ce titre dans une centrale, somme considérable, n'augmente le coût du kWh que de moins de 2 ct.). *Ce n'est qu'à condition que de telles garanties soient réalisées que l'on pourrait envisager le recours au nucléaire évoqué plus haut.*

**Des centrales nucléaires fonctionnent depuis plus de 30 ans, cumulant près de 10 000 années-réacteurs de marche** (installations de recherche et prototypes non compris). Il s'agit donc déjà d'une base notable d'appréciation des risques. Or, durant ce délai, *on n'a enregistré que deux accidents graves*, l'un aux USA (Three Mile Island, 1976), et l'autre en URSS (Tchernobyl, 1986) (ceci dit, sous réserve de non-publication éventuelle d'accident ancien en URSS, et de non-prise en compte d'accident dans des installations de recherche, telle la centrale expérimentale de Lucens).

**A Tchernobyl**, il y a eu perte de contrôle du réacteur (seul cas connu), conduisant brièvement à une pointe de puissance de l'ordre de 100 fois la puissance normale, et à un dégagement d'énergie tel que le réacteur a explosé (explosion mécanique-thermique mais non atomique). On sait que la masse de graphite constituant le réacteur a pris feu et que l'incendie a entraîné en altitude les substances radioactives contenues dans le cœur du réacteur; les vents les ont ensuite disséminées de l'Europe à la Sibérie.

*Ce n'est pas ici le lieu d'analyser en détail cet accident exceptionnel, mais il convient néanmoins de rappeler qu'il s'agissait d'un type de réacteur (RBMK) qui n'existe qu'en URSS, dont la construction n'aurait pas été autorisée en Occident (instabilité connue, mécanisme lent d'arrêt d'urgence, absence d'enceinte de confinement, etc.), où l'on a voulu procéder à un essai de fonctionnement très spécial, conduit par une équipe étrangère à la centrale et non compétente en matière nucléaire. Pour conduire l'essai, l'équipe a mis progressivement hors circuit la quasi-totalité des dispositifs de sécurité existants, et n'a pas tenu compte des alarmes, ces dernières prescrivant l'arrêt immédiat.*

Si l'accident n'a fait qu'un nombre limité de morts (31) à court terme, les conséquences pour les populations de la région apparaissent très lourdes, surtout du point de vue économique et social. Quant aux effets différés sur la santé de ces populations (p. ex. leucémies), les opinions des personnes compétentes divergent dans de très larges mesures; il se peut que ces effets soient importants mais cela n'est nullement établi à l'heure actuelle.

*Etant donné le type du réacteur, la nature de l'essai tenté et ses conditions d'excécution, on ne peut, en toute honnêteté, en tirer aucune conclusion quant à la sûreté des réacteurs occidentaux.*

L'accident de *Three Mile Island* a été provoqué par une défaillance du système de refroidissement du réacteur (qui en extrait la chaleur dont on désire précisément disposer). Il s'est agi essentiellement d'une succession d'erreurs humaines (non-respect de diverses prescriptions, interprétation erronée des informations, non-fonctionnement de certains dispositifs). Il en est résulté une fusion partielle du cœur du réac-

teur, avec libération limitée de substances radioactives, retenues cependant dans l'installation.

*Si grave qu'ait été cet accident, les dispositions de sécurité ont fait que personne n'a été touché dans sa santé, ni dans le personnel ni dans la population avoisinante (tout comme à Lucens).*

Cet accident, et bien d'autres incidents moins graves survenus ailleurs au fil des années, ont fait l'objet d'examens attentifs, et tant les constructeurs que les exploitants améliorent sans cesse les installations et la formation de leur personnel.

*La question n'est donc pas de savoir si l'on doit arrêter de construire des installations du type occidental* (et si elles sont à ce point dangereuses, on devrait également mettre hors service celles qui existent) parce qu'en URSS un très grave accident s'est produit dans une installation de type différent et dans les circonstances particulières rappelées plus haut (c'est la poursuite de l'exploitation des RBMK soviétiques dont on devrait peut-être demander l'arrêt ...). *La question est celle de fixer les exigences de sécurité que l'on entend obtenir dans les installations occidentales, et de bien établir les méthodes de contrôle correspondantes. La sécurité atteinte actuellement est très élevée (à preuve le faible nombre des accidents), mais si on estime qu'elle doit être encore plus grande, rien n'empêche de l'exiger.*

Reste la question de la gestion des déchets. On distingue parmi ceux-ci les déchets faiblement ou moyennement radioactifs de ceux qui sont hautement radioactifs. Les provenances en sont diverses, allant de survêtements peu ou pas contaminés, aux filtres retenant des poussières ou des substances faiblement actives, à des pièces usagées rendues radioactives parce qu'ayant été soumises à un flux de neutrons, jusqu'aux produits de fission proprement dits. Parmi ces derniers, une faible part (quelques %) sont hautement radioactifs et exigent des traitements tout à fait particuliers.

Une certaine radioactivité étant omniprésente dans la nature, il était admis autrefois que les déchets faiblement actifs pouvaient être dilués et dispersés, sans que les taux naturels d'activité ne soient augmentés de manière sensible. Cela n'est plus le cas actuellement et tous les déchets actifs sont récoltés, concentrés s'il y a lieu, et stockés dans des conditions assurant qu'ils ne risquent pas de contaminer la biosphère. Le facteur «temps» joue ici un rôle puisque la radioactivité est une propriété qui disparaît progressivement (ce qui n'est pas le cas des substances chimiquement nocives, qui le restent ad perpetuum).

*C'est le traitement des déchets hautement actifs qui doit ici retenir particulièrement notre attention* (il s'agit notamment des actinides, noyaux lourds, de longue vie, et émetteurs de particules alpha qui sont dangereuses si elles sont ingérées et fixées dans l'organisme, alors même que leur pouvoir de pénétration est généralement très faible: elles sont arrêtées par une feuille de papier).

Or les quantités de ces produits hautement actifs sont faibles. Pour une grande centrale nucléaire, ces déchets, après intégration dans un verre spécial (pour

les fixer dans une substance insoluble) coulé dans des tubes métalliques, n'occupent que 3 m<sup>3</sup> par année de fonctionnement. On peut alors stocker ces conteneurs en profondeur dans la montagne, dans une zone géologique appropriée (stable, sans circulation d'eau).

*A l'échelle mondiale, et en reprenant l'hypothèse formulée précédemment d'une production nucléaire de 400 EJ/an (80 % de l'accroissement supposé des besoins dans 50 ans) les 4000 centrales nouvelles (ou leur équivalent) produiraient par an environ 15 000 m<sup>3</sup> de tels déchets hautement actifs, après traitement et conditionnement (c'est le volume d'un cube de 25 m de côté). Il n'y a pas de doute qu'avec les possibilités d'une population double de celle d'aujourd'hui, ayant atteint en moyenne un niveau de vie voisin lui aussi du double, la maîtrise d'un tel volume de déchets est parfaitement possible.*

La production actuelle de ces déchets, de l'ordre de 1000 m<sup>3</sup>/an pour le monde entier, est assez limitée pour qu'il n'y ait pas urgence à en assurer dès maintenant le stockage définitif; on dispose encore pour le moins de 10 ans, peut-être 20, pour perfectionner les processus et les tester.

### § c) Conclusions quant à la comparaison «combustibles fossiles – nucléaire»

Si, comme on l'a vu, aussi bien l'une que l'autre de ces deux importantes sources d'énergie, et elles seules, sont susceptibles de couvrir l'accroissement probable des besoins dans les cinquante prochaines années (et au-delà si d'autres possibilités, telles que la fusion, ne suffisent pas), les problèmes que leur utilisation paraissent devoir soulever sont très différents.

A première vue, il s'agit, entre deux maux, de choisir le moindre. Présenté ainsi, le choix est vite fait:

- d'un côté, les combustibles fossiles, avec la haute probabilité de modifications climatiques importantes allant en s'aggravant, et pouvant entraîner des conséquences quasi-innombrables (désertification, modification profonde du régime des eaux, changements radicaux de cultures, grands mouvements de populations, etc., etc.), pollutions atmosphériques diverses, modifications par ailleurs irréversibles
- de l'autre côté, le nucléaire de fission, sans atteinte à l'environnement et dont on peut à volonté réduire les nuisances.

Cependant, cette appréciation initiale doit être nuancée:

- la nature et l'ampleur des effets des combustibles fossiles ne sont pas encore établies avec précision: il s'y superpose des causes naturelles insuffisamment connues (p. ex. variations de l'activité solaire); si l'accroissement de l'effet de serre paraît incontestable, il interférera avec de nombreux autres phénomènes pouvant l'accentuer ou l'atténuer
- le remplacement des combustibles fossiles dans leurs usages actuels par de l'énergie nucléaire

imposera des changements très importants dans des installations les plus diverses (distribution de chaleur, transports routiers, etc.)

- des intérêts économico-politiques très considérables seront touchés, que l'on cherchera à protéger et qui provoqueront des résistances difficiles à surmonter.

*En l'état actuel des connaissances, et compte tenu des besoins futurs probables en énergie, compte tenu aussi des conséquences probables de l'un ou l'autre choix, on doit, nous semble-t-il:*

- a) poursuivre fermement toute politique visant à la meilleure utilisation possible de l'énergie (installations plus performantes, lutte contre les gaspillages)
- b) continuer activement à développer les installations nucléaires pour en accroître encore la sûreté, poursuivre la mise au point de la gestion des déchets et celle des générateurs, de telle sorte que les dangers du nucléaire se situent à un niveau jugé acceptable
- c) se préparer à devoir stabiliser le recours aux combustibles fossiles, en leur substituant dès à présent le nucléaire dans leurs nouveaux usages, là où cela peut se faire sans difficultés majeures (production d'électricité, chauffage urbain, p. ex.)
- d) persévérer, dans une mesure raisonnable, dans les tentatives de valorisation des autres formes d'énergie, solaire en particulier, mais surtout fusion nucléaire, dont il est très important de connaître les possibilités et les problèmes aussitôt que possible.

*Ce qu'il ne faut certainement pas faire, c'est s'opposer au nucléaire (qui a des probabilités notables d'être dans peu de décennies la seule solution à l'échelle des besoins) et, pour le reste, laisser les choses aller (donc continuer à s'appuyer essentiellement sur les combustibles fossiles) en espérant que les problèmes ne seront pas aussi graves que certains le craignent. Pour quelques années encore le choix «combustibles fossiles – nucléaire» doit rester ouvert, tous les efforts étant faits pour qu'il subsiste à disposition une option nucléaire satisfaisante (sûreté, déchets, génératrices).*

### § d) Essai de projection jusqu'en 2100

Il est utile de s'assurer que les évaluations faites pour la période 1990-2040 peuvent s'inscrire de manière plausible dans une projection s'étendant au-delà de 2040, par exemple jusqu'en 2100, tout en restant conscient de la grande fragilité d'une telle projection.

Partant d'une estimation vraisemblable d'un taux de croissance de la population mondiale, qui continuerait à diminuer régulièrement, et d'un taux d'augmentation de la consommation d'énergie par habitant (donc du niveau de vie) qui s'abaisserait jusqu'à 0,5%/an (dont il faut bien mesurer que cela signifie que cette consommation n'augmenterait plus pour une grande partie de l'humanité, afin qu'elle puisse progresser pour les moins favorisés), on obtient arithmétiquement la consommation totale.

Cette consommation (voir annexe D), qui augmentait d'environ 3%/an entre 1970 et 1980 (malgré la crise du pétrole), ne s'accroîtrait plus que de 1%/an vers 2080-2100. La moitié en provient de l'évolution démographique.

**Ainsi la consommation mondiale se situerait-elle à l'ordre de 1600 à 1700 EJ en 2100 (ou, de manière moins précise, entre 1500 et 2000 EJ/an).**

Note: Signalons que l'Institut international IIASA de Laxenburg, Autriche, estime cette consommation mondiale probable pour l'an 2100 à 3 600 EJ, soit 10 milliards d'habitants consommant 360 GJ/hab. (ici 14 milliards et 120 GJ).

La figure 7 montre comment on peut imaginer que cette consommation soit couverte, compte tenu des réflexions présentées plus haut. La part des combustibles fossiles ne dépasserait pas 300 EJ/an durant cette période, réduite même à 200 EJ/an vers 2100 (ce qui est encore beaucoup si les effets néfastes de l'effet de serre se confirment). Le nucléaire de fission passerait par un maximum de 600 EJ/an vers 2070-2080 (50% de plus qu'en 2040).

Il est probablement très optimiste de penser que les autres énergies, sauf la fusion, pourront couvrir, 400 EJ/an, la majeure partie venant d'un développement intensif du solaire.

Enfin, la fusion nucléaire verrait sa contribution quintupler en 60 ans (de 80 à 400 EJ entre 2040 et 2100), ce qui suppose que son utilisation ne soulèvera pas d'obstacles majeurs non encore identifiés.

Au cours du 21<sup>e</sup> siècle, on ferait ainsi appel aux ressources de combustibles fossiles pour un total d'environ 30 000 EJ, ce qui est aisément compatible avec le volume des réserves admises. L'appel cumulé au nucléaire de fission se situerait à l'ordre de 40 000 EJ, ce qui impose vraisemblablement l'emploi d'une certaine proportion de surgénérateurs, comme déjà dit.

Cette vision d'ensemble paraît donc cohérente, malgré les grandes incertitudes qu'elle comporte.

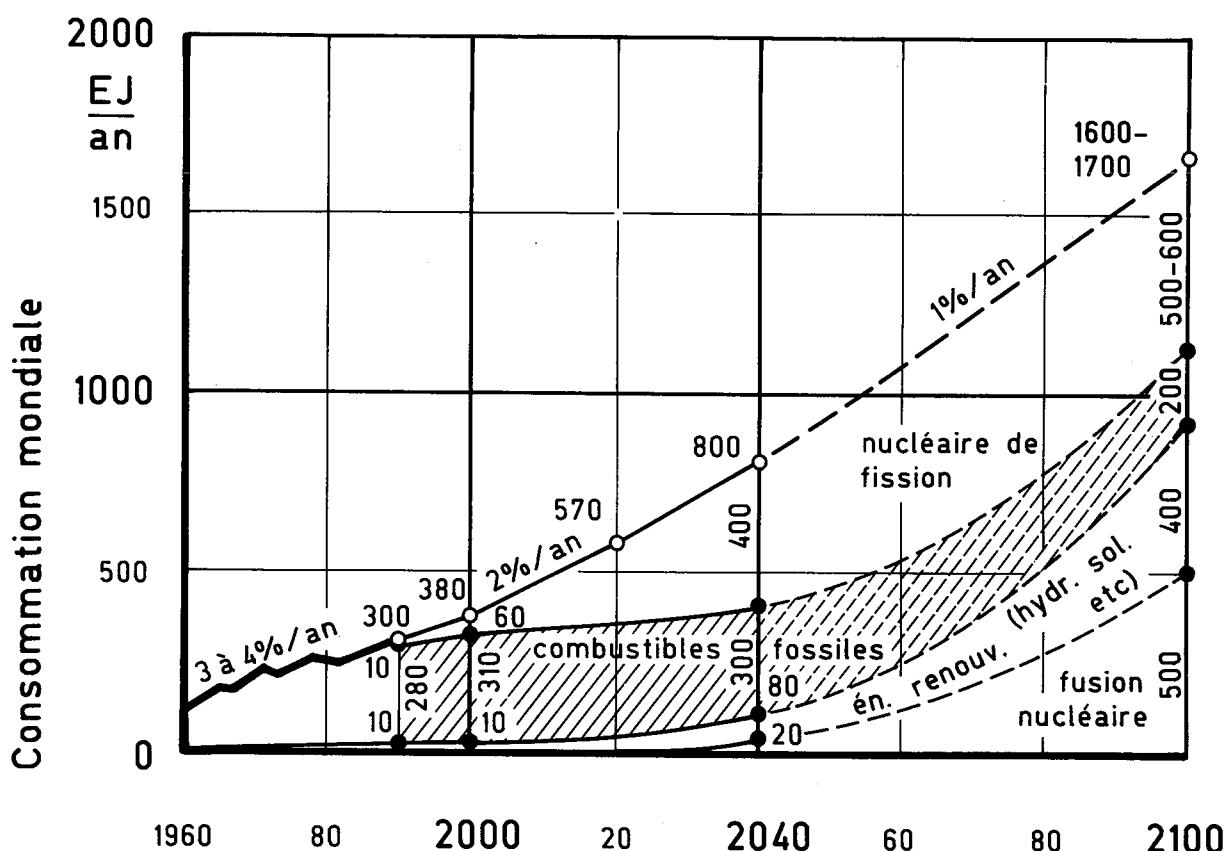


Fig. 7  
Essai de projection jusqu'en 2100  
de la consommation mondiale  
d'énergie primaire  
et mode de couverture



## DEUXIÈME PARTIE

# PERSPECTIVES ÉNERGÉTIQUES SUISSES À MOYEN TERME

Alors que dans ce qui précède, à l'échelle mondiale, il s'est agi d'énergie primaire, nous examinerons le cas de la Suisse au niveau de l'**énergie distribuée** (électricité, combustibles, carburants), pour laquelle on dispose des indications précises établies par l'Office fédéral de l'énergie; étant vendue aux consommateurs, elle est exactement comptabilisée (elle est parfois désignée par «énergie finale», mais elle n'est «finale» que pour le vendeur; elle est au contraire «initiale» pour le consommateur).

Dans l'ensemble, nous suivrons la même démarche qu'à l'échelle mondiale, tenant compte de l'évolution économique probable, de sa relation avec la consommation par habitant et des pronostics possibles quant à l'effectif de la population, pour aboutir à une estimation des besoins énergétiques vraisemblables à moyen terme, c'est-à-dire dans 10 à 20 ans. Il conviendra alors de supputer comment ces besoins pourront être couverts.

### Chapitre 4

## CONSOMMATION ACTUELLE ET ÉVOLUTION RÉCENTE

Avant de préciser ce qu'il en est en énergie distribuée, indiquons cependant qu'en **énergie primaire**, la Suisse en a utilisé en 1989 environ 1 EJ (comme déjà

dit plus haut) soit 1010 PJ (1 PJ =  $1000^5$  J ou  $10^{15}$  J, du grec «penta» = 5). Cette énergie primaire était formée de:

|                                   |                             |          |       |
|-----------------------------------|-----------------------------|----------|-------|
| – production indigène:            | bois .....                  | 12 PJ    | 1%    |
|                                   | ordures et déchets .....    | 23 PJ    | 2%    |
|                                   | hydraulique .....           | 137 PJ   | 14%   |
|                                   | Sous-total .....            | (172 PJ) | (17%) |
| – importation:                    | charbon .....               | 15 PJ    | 1%    |
|                                   | pétrole brut .....          | 128 PJ   | 13%   |
|                                   | produits pétroliers .....   | 398 PJ   | 40%   |
|                                   | gaz .....                   | 71 PJ    | 7%    |
|                                   | combustible nucléaire ..... | 235 PJ   | 23%   |
|                                   | Sous-total .....            | (847 PJ) | (84%) |
| – solde exportateur d'électricité |                             | – 9 PJ   | – 1%  |
|                                   | Total .....                 | 1010 PJ  | 100%  |

Ce tableau souligne que la Suisse est au monde l'un des pays (avec le Japon) le plus dépendant de l'étranger pour son approvisionnement énergétique.

Après déduction des pertes de transformation et de distribution, on constate que le total de l'énergie qui a été distribué en 1989, de 778 PJ, se répartit comme suit:

|                            |                   |         |
|----------------------------|-------------------|---------|
| – combustibles pétroliers: | 269 PJ            |         |
| – carburants:              | 236 PJ            | (30,3%) |
| (sous-total pétrole):      | (505 PJ ou 64,9%) |         |
| – électricité:             | 164 PJ            | (21,1%) |
| – gaz:                     | 65 PJ             | (8,4%)  |
| – charbon:                 | 14 PJ             | (1,8%)  |
| – bois:                    | 12 PJ             | (1,5%)  |
| – chaleur à distance:      | 11 PJ             | (1,4%)  |
| – déchets industriels:     | 7 PJ              | (0,9%)  |
| Total:                     | 778 PJ            | (100%)  |

Il est sans doute intéressant de relever la notable diminution en une vingtaine d'années de la part du **pétrole**, qui atteignait 80% en 1973; toutefois, il s'agit essentiellement d'une forte diminution du recours aux combustibles pétroliers (55% du total général, 371 PJ en 1973) tandis que la part des **carburants** a nettement crû (25% ou 165 PJ en 1973). Dès cette même époque, et malgré la crise du pétrole, la part du **charbon** est restée très faible (13 PJ en 1973), alors qu'elle atteignait 65% en 1930 et encore 41% en 1950. Le rôle du gaz n'a cessé de progresser régulièrement (11 PJ ou 2,4% en 1973, 34 PJ ou 4,9% en 1980). Notons enfin que la place de l'**électricité** a augmenté également, quoique moins rapidement (104 PJ ou 15,4% en 1973, 127 PJ ou 18,6% en 1980).

*La répartition de cette énergie distribuée entre les différentes catégories de consommateurs* est utile à connaître pour apprécier les évolutions vraisemblables à l'avenir:

| 1989, en PJ                            | Produits pétroliers | Électricité | Gaz | Charbon<br>Chaleur<br>Déchets<br>Bois | Total |
|--|---------------------|-------------|-----|---------------------------------------|-------|
| Ménages .....                          | 149                 | 46          | 27  | 13                                    | 235   |
| Industrie .....                        | 45                  | 55          | 26  | 24                                    | 150   |
| Artisanat, agriculture, services ..... | 80                  | 54          | 13  | 5                                     | 152   |
| Transports .....                       | 232                 | 9           | —   | —                                     | 241   |

Quant aux variations par rapport à l'année précédente, signalons la progression de l'utilisation du gaz par les ménages (+ 7%), l'industrie (+ 12%) et le groupe de l'artisanat, etc. (+ 8%). Si le recours total aux produits pétroliers n'a que peu changé (+ 0,4%), on doit signaler qu'il y a eu d'une part diminution des usages industriels (- 5%) mais augmentation par les transports (+ 4%).

Enfin, tous les consommateurs ont accru leur appel à l'électricité (de 2 à 4%, soit environ 3% pour le total).

Ainsi, alors que la consommation totale des ménages est restée stable de 1988 à 1989, celle de l'industrie a augmenté de 1,4%, mais seulement de 0,6% pour le groupe de l'artisanat, etc., tandis que celle des transports s'est accrue de 3,8%.

Complétons cette information quant à la situation actuelle en indiquant que les 778 PJ d'énergie distribuée permettent aux consommateurs d'en tirer **437 PJ d'énergie utile**, à savoir:

|                       |        |       |
|-----------------------|--------|-------|
| – chaleur             | 325 PJ | 74,5% |
| – travail mécanique   | 104 PJ | 24,0% |
| – processus chimiques | 5 PJ   | 1,1%  |
| – lumière             | 2 PJ   | 0,4%  |
| Total                 | 436 PJ | 100 % |

On remarque que la transformation de l'énergie distribuée en énergie utile entraîne des pertes importantes de 44% (342 PJ), pourcentage qui a crû très lentement (41% en 1973). Mais cette évaluation des pertes dépend de la manière dont les énergies sont définies; par exemple, on ne fait pas ici de différence entre les divers niveaux de température auxquels la chaleur est utilisée. **Seule une approche exergétique de la question permet des appréciations correctes** (on compte alors toutes les énergies pour le travail mécanique qu'on en peut tirer, voir annexe G), mais cela sort du cadre du présent exposé. On constate alors que **les pertes sont encore bien plus importantes qu'il n'y paraît ici**, les principales provenant du faible rendement des moteurs à explosions ou de ce qu'il n'est pas tiré parti du saut de température existant dans les installations de chauffage entre le foyer de la chaudière (p. ex. 1000 °C) et l'eau du circuit de chauffage (p. ex. 70 °C) (cette dernière perte peut être réduite par l'emploi de pompes à chaleur) (voir Annexes H et J).

## Chapitre 5

### CORRÉLATION «PIB/HAB. – ÉNERGIE DISTRIBUÉE»

#### § a) Evolution du PIB par habitant

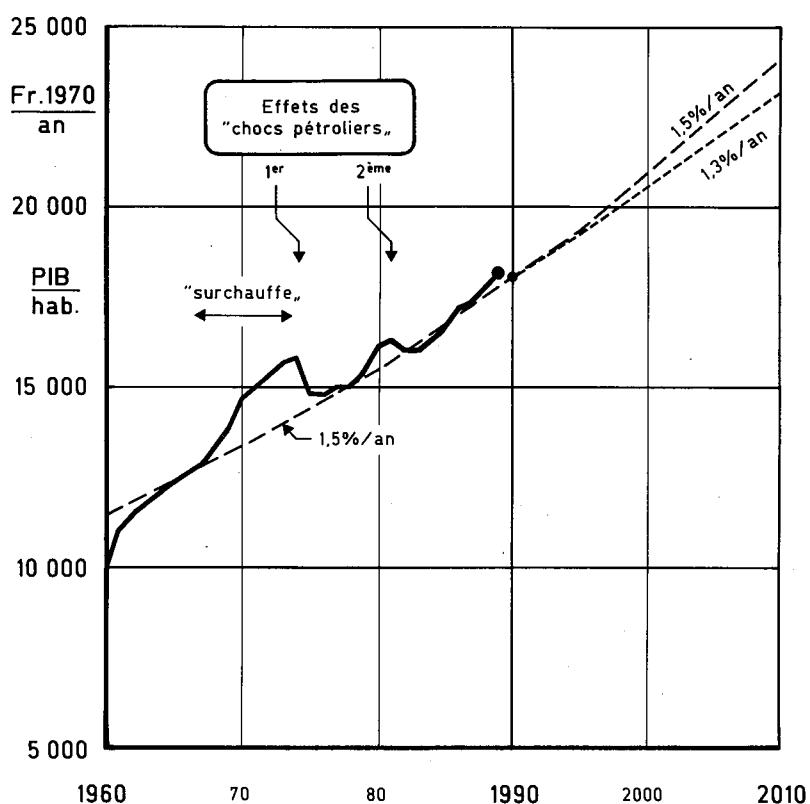
La situation actuelle étant ainsi précisée, **nous devons nous demander comment pourrait évoluer le niveau de vie en Suisse, à moyen terme**. Comme nous l'avons fait au niveau international, nous prendrons comme indicateur le produit intérieur brut (PIB) par habitant.

La figure 8, établie en francs constants 1970, montre comment ce PIB/hab. a évolué de 1965 à 1989. On y voit clairement la «surchauffe» de très haute conjoncture de 1967 environ à 1974, puis la forte récession consécutive à la «crise du pétrole», ainsi que l'effet du

2<sup>e</sup> «choc pétrolier» de 1980 (effets chaque fois différés de 1 à 2 ans). Mais on ne peut manquer d'être frappé par le fait qu'à chaque fois, le PIB/hab. revient au niveau d'une progression moyenne régulière au taux de 1,5% par an.

Si 1989 se trouve légèrement au-dessus de l'accroissement à 1,5%/an, on sait déjà que la conjoncture économique s'est alourdie en 1990 et que la progression va encore se ralentir en 1991; on va donc probablement se retrouver proche de la courbe à 1,5%/an. C'est d'ailleurs précisément l'augmentation probable annoncée pour 1991 par divers organismes de prospective.

Fig. 8  
*Produit intérieur brut par habitant en Suisse en francs 1970 (dès 1990 projections à 1,5 ou 1,3%/an)*



**Qu'en sera-t-il au-delà, et jusque vers 2010 par exemple?**

Certes, la situation économique et politique mondiale ne permet pas d'imaginer le retour prochain d'une période de haute conjoncture analogue à celle de 1967-1974 (augmentation du PIB/hab. de 3% par an). La nécessaire aide des pays industrialisés à l'Europe de l'Est (URSS comprise), celle aux pays moins développés et la prise en charge probable de leur énorme dette, le déficit américain, sont autant d'éléments qui, avec d'autres, vont peser sur l'économie mondiale. Mais, d'un autre côté, l'intégration européenne, qui va se poursuivre, devrait stimuler l'économie, de même que les efforts persévérateurs de libéralisation des échanges mondiaux et de maîtrise des inflations.

En Suisse, cependant, on doit s'attendre au maintien dorénavant de taux d'intérêts analogues à ceux pratiqués dans le reste de l'Europe, de même qu'à une adaptation semblable des salaires et des pouvoirs d'achat.

**S'il paraît possible que le taux moyen de croissance du PIB/hab. reste de 1,5% par an entre 1990 et 2010,** il se peut que ce soit une hypothèse un peu optimiste et que l'on doive également prendre en considération une hypothèse légèrement plus prudente, par exemple 1,3%/an.

Dès lors le PIB/hab. en francs constants serait multiplié par:

en 2000      en 2010

|           |       |       |
|-----------|-------|-------|
| à 1,3%/an | 1,138 | 1,295 |
| à 1,5%/an | 1,161 | 1,347 |

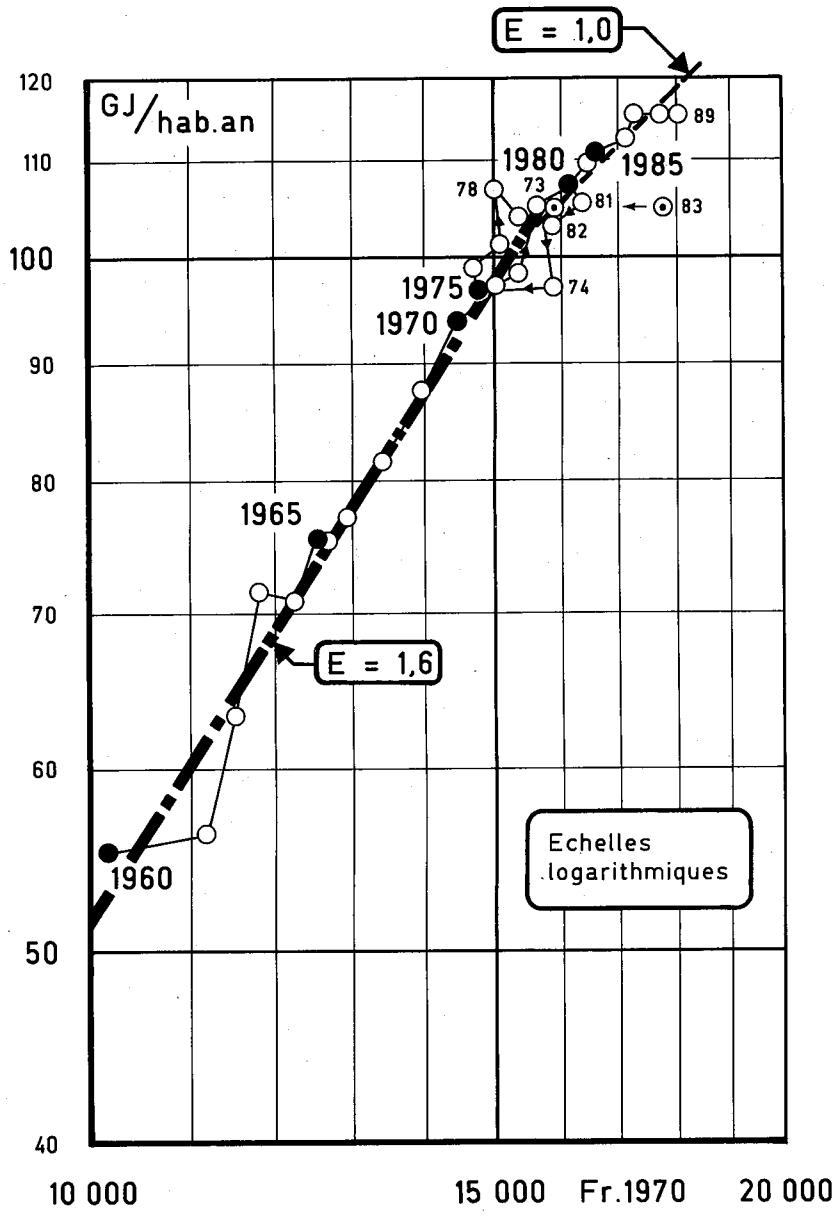
(en gros: + 15% en 2000, + 32% en 2010).

### § b) Relation entre PIB et composants de l'énergie distribuée

La consommation suisse en énergie distribuée va-t-elle augmenter proportionnellement, ainsi que nous avons vu que cela a généralement été le cas au niveau mondial?

**La figure 9 montre ce qu'a été la corrélation entre cette consommation par habitant et le PIB, par habitant aussi, de 1960 à 1989.** On y voit que de 1960 à 1973, il y a eu une progression régulière de la consommation, mais dépassant nettement la simple proportionnalité: la croissance a été proportionnelle à la puissance 1,6 du PIB (donc 16% d'énergie en plus pour 10% d'accroissement du PIB).

Cette phase est suivie par un court cycle de récession (1973-1975) et de reprise (1975-78-80), jusqu'au second «choc pétrolier» qui provoque un second cycle, plus atténué, (1980-1983), et une reprise (1983-1988) plus lente, selon une loi voisine de la proportionnalité. S'il



| ANNÉE | Combustibles |     |         |      |                                      |                | Carburants | Total prod.pétroliers | Electricité | TOTAL énergie distribuée | PIB/hab. kfr. 1970 |
|-------|--------------|-----|---------|------|--------------------------------------|----------------|------------|-----------------------|-------------|--------------------------|--------------------|
|       | Pétroliers   | Gaz | Charbon | Bois | Chal. à distance<br>ordures, déchets | Total combust. |            |                       |             |                          |                    |
| 1960  | 17,4         | 1,0 | 12,6    | 2,7  | —                                    | 33,8           | 10,6       | 28,0                  | 10,7        | 55,1                     | 10,1               |
| 1970  | 50,5         | 1,2 | 3,5     | 1,6  | 0,5*                                 | 57,7           | 22,0       | 72,5                  | 14,4        | 94,1                     | 14,5               |
| 1973  | 57,7         | 1,6 | 2,0     | 1,6  | 1,0*                                 | 63,8           | 25,7       | 83,4                  | 16,1        | 105,6                    | 15,6               |
| 1975  | 49,2         | 3,3 | 1,5     | 1,3  | 1,2*                                 | 56,5           | 24,4       | 73,5                  | 16,2        | 97,1                     | 14,7               |
| 1980  | 48,5         | 5,3 | 2,1     | 1,5  | 1,4                                  | 59,2           | 28,0       | 76,5                  | 19,9        | 107,1                    | 16,1               |
| 1989  | 40,0         | 9,7 | 2,1     | 1,8  | 2,6                                  | 56,2           | 35,1       | 75,1                  | 24,4        | 115,7                    | 18,2               |

Tableau 10  
Energie distribuée, consommée  
par habitant (GJ/hab-an)  
et PIB par habitant (Fr. 1970)  
(\* estimation de l'auteur)  
(kfr.: milliers de francs)

y a stagnation de la consommation par habitant de 1987 à 1989, la période de 2 ans paraît trop courte pour en tirer une conclusion durable.

On peut se demander quelles sont les causes de la progression à la puissance 1,6, exceptionnelle, de 1960 à 1973, puis de nets changements dès 1973; s'agit-il de facteurs qui pourraient persister à l'avenir?

**Le tableau 10 donne de 10 en 10 ans la décomposition de l'énergie distribuée selon les sources**, ainsi qu'en 1973 et 1975 (années particulières précédant et suivant la récession), énergie par habitant, car il y a eu de notables variations de l'effectif de la population résidant en Suisse durant cette période, ainsi que nous le verrons plus loin.

**Notre préoccupation étant celle de la corrélation de ces consommations avec le PIB, les valeurs du tableau sont reportées en fonction de ce PIB à la figure 11.** Pour ne pas alourdir exagérément la figure nous n'avons, pour les combustibles, reporté que leur total (et l'huile de chauffage). Le faisceau de droites obliques (en pointillé) correspond à des progressions proportionnelles «énergie/PIB». On peut y faire les observations principales suivantes (étant entendu que les chiffres indiqués dépendent un peu des années retenues, les progressions n'étant pas tout à fait régulières).

#### b1. de 1960 à 1970 (et même 1973)

– La consommation totale par habitant a augmenté en moyenne de 5,4%/an, tandis que le PIB/hab. progressait de 3,7%/an. En d'autres termes, la

consommation a augmenté avec la puissance 1,5 du PIB, donc bien au-delà de la proportionnalité (ce qui était déjà visible sur la figure 9).

- Il en est exactement de même des seuls **combustibles**; quoiqu'une partie des combustibles soit utilisée dans l'industrie, il apparaît que les Suisses se sont mis à se chauffer davantage (de fait, on a passé d'une température de 18-20 °C dans les locaux à 22-24 °C), mais peut-être aussi à être moins attentifs à une bonne isolation thermique des immeubles neufs (voir Annexe F).
- Le tableau fait ressortir que, simultanément, on a remplacé dans une large mesure le **charbon** par l'**huile de chauffage**, dont la consommation par habitant a augmenté de 11%/an en moyenne (puissance 3 du PIB).
- La consommation en **carburant** par habitant a progressé de 7,6% par an, donc avec le carré du PIB (sans doute augmentation simultanée des cylindrées des moteurs et du kilométrage, et aussi un accroissement du transport routier).
- **La rapide augmentation en combustibles et celle en carburant sont les causes de l'accroissement total au-delà de la proportionnalité, car pour l'électricité, la consommation a augmenté en moyenne de 3,0% par an, donc un peu moins rapidement que le PIB.** Cette constatation doit sans doute être soulignée car c'est une opinion répandue, à tort, qu'en haute conjoncture (1960-1970 p. ex.), les Suisses ont fait un appel particulièrement croissant à l'électricité; il y a bien eu augmentation mais pas plus rapide que le niveau de vie.

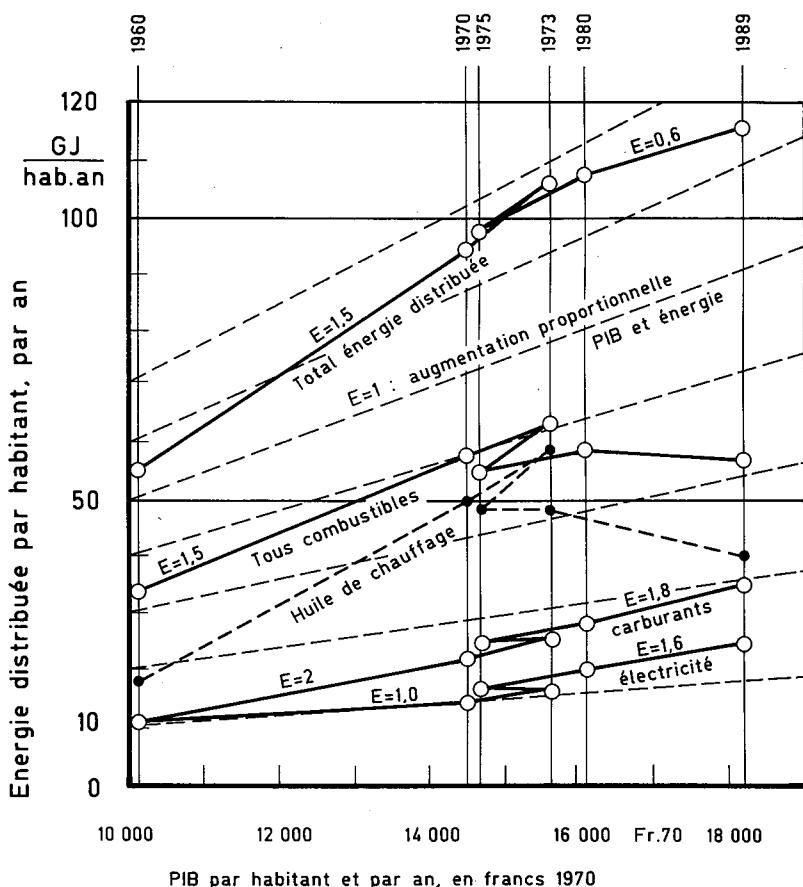
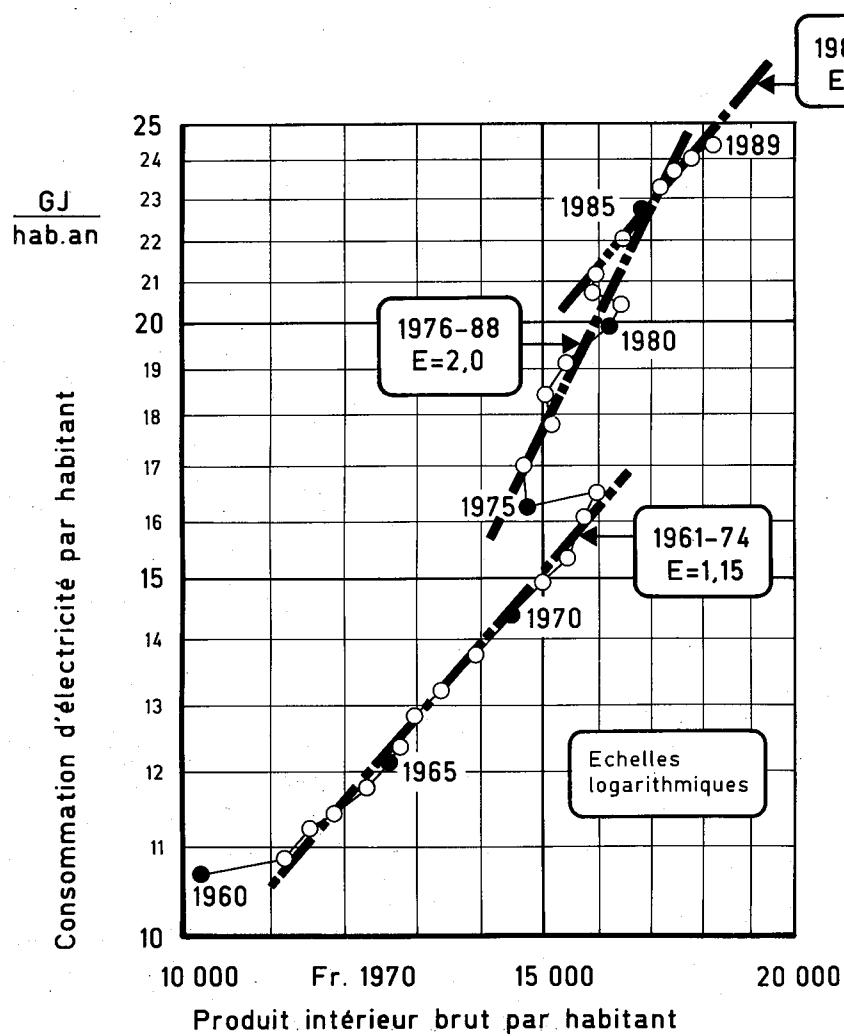
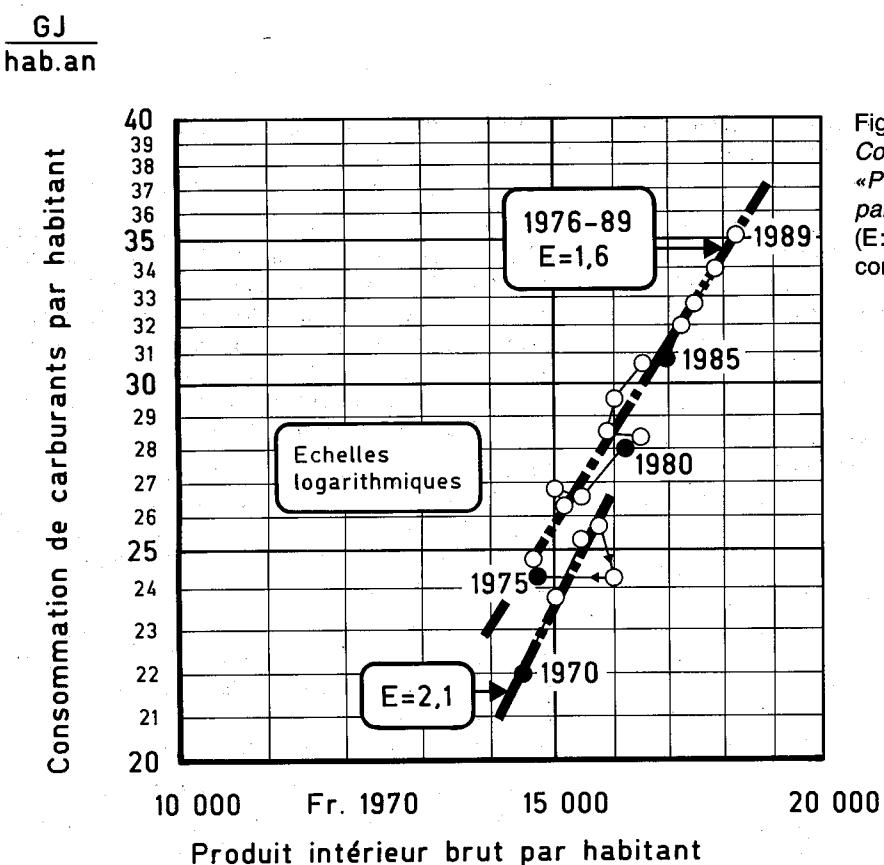


Fig. 11  
Relation «PIB – Energie distribuée» par habitant, selon nature de l'énergie  
(E: exposant dans En. distr. = Cte PIB<sup>E</sup>)



b2. **de 1980 à 1989**, période comprenant l'effet du 2<sup>e</sup> «choc pétrolier»

- La progression de la **consommation totale** (par habitant) s'est beaucoup ralenti, passant de 5,4%/an entre 1960 et 1970 à 0,9%/an, l'augmentation du PIB diminuant par ailleurs de 3,7%/an à 1,4%/an. *Cette consommation totale a donc été inférieure à la proportionnalité* (puissance 0,6 du PIB).
- Pour l'ensemble des **combustibles**, il y a même eu un léger recul, de – 0,6%/an. La diminution marquée du recours aux **combustibles pétroliers** (– 2,1%/an) n'a pas été entièrement compensée par la très forte progression relative **du gaz** (6,9%/an) étant donné la part encore limitée prise par le gaz (qui passe cependant de 9 % de l'ensemble des combustibles à 17%).
- **L'accroissement du recours aux carburants** s'est, lui aussi, ralenti, passant de 7,6%/an précédemment à 2,5%/an. Il est néanmoins **bien supérieur à la proportionnalité au PIB** (puissance 1,8) donc voisine du carré du PIB, comme auparavant. Cette forte progression du recours aux carburants par rapport à l'accroissement du PIB, par habitant, mérite un examen un peu plus attentif. Nous l'avons donc reporté en échelles logarithmiques à la figure 12, de 1970 à 1989. On y voit clairement que dès 1976, et malgré l'effet temporaire du 2<sup>e</sup> «choc pétrolier» (1980-82), la consommation en carburants a augmenté avec la **puissance 1,6 du PIB**, et cela avec une régularité particulièrement frappante dès 1985.
- Par contre l'appel à l'**électricité a continué de croître**, à un rythme peu inférieur à celui de la haute conjoncture: 2,3%/an au lieu de 3%. L'augmentation du PIB ayant diminué, la **consommation d'électricité a progressé nettement au-delà de la proportionnalité** (avec la puissance 1,6 du PIB, et même avec le carré du PIB de 1976 à 1987). Cela est évidemment dû pour une part importante à des **substitutions de l'électricité aux combustibles pétroliers** (suite à l'élévation du coût de ces derniers, et des incertitudes sur leurs disponibilités suffisantes à l'avenir).

b3. **Relation PIB et électricité distribuée**

*La possibilité de continuer à procéder à de telles substitutions dépendant des disponibilités en électricité (hydraulique, importations nucléaires), et pouvant jouer un grand rôle dans l'évolution à venir du mode de couverture des besoins énergétiques suisses, l'évolution passée en rapport avec celle du PIB fait l'objet d'une figure plus détaillée (figure 13).* On y observe le changement frappant consécutif à la crise du pétrole de 1973 (on remarquera aussi la remarquable régularité de la progression de 1961 à 1974).

On peut aussi discerner un changement après le 2<sup>e</sup> «choc pétrolier», de 1983 à 1988: la consommation d'électricité par habitant s'est accrue à nouveau plus rapidement, de 2,6%/an, de même que le PIB, à 2,2%/an, signes clairs d'une bonne conjoncture économique. L'électricité augmente alors avec la puis-

sance 1,17 du PIB, c'est-à-dire selon une loi semblable à celle suivie de 1961 à 1974.

Il semble que la progression se soit encore ralenti entre 1986 et 1989: 1,7%/an d'électricité par habitant pour un accroissement de 2,0%/an du PIB (puissance 0,84 du PIB). Peut-on y voir la conséquence d'une volonté renforcée d'économiser l'électricité? La période de référence paraît cependant trop courte pour permettre une affirmation.

On retiendra qu'en moyenne durant les 6 ans de 1983 à 1989, il y a croissances voisines de la consommation d'électricité et du PIB (par habitant), la première augmentant à la puissance 0,86 du second.

b4. **Conclusions quant à la consommation actuelle des diverses énergies distribuées en relation avec l'évolution du PIB par habitant**

*Le moment est venu de tirer les conclusions de cette analyse de la corrélation entre la consommation d'énergie et le PIB dans le proche passé, conclusions qui devront nous aider à estimer ce que pourra être l'évolution à l'avenir, ce qui est notre objectif.*

*Ces conclusions, nous les baserons sur l'entier de la période 1975-1989, 14 ans constituant une base d'appréciation suffisamment longue pour estomper les écarts particuliers aux années de référence; en outre cette période comprend aussi bien des années de bonne conjoncture (p. ex. 1976-1980, ou 1983-1988) que les années défavorables consécutives au 2<sup>e</sup> «choc pétrolier» (1981-1983).*

Rappelons enfin qu'il ne s'agit pour l'instant que de valeurs par habitant (il faudra donc par la suite évaluer l'incidence de la variation possible de l'effectif de la population) et que le PIB est toujours admis en valeurs réelles (francs 1970 et non francs courants).

1. Durant cette période, la **consommation totale des énergies distribuées** a augmenté en moyenne de 1,4% par an (1,36), tandis que le PIB croissait de 1,5% par an (1,54). Cette consommation a donc cru légèrement moins vite que la simple proportionnalité au PIB (avec la puissance 0,88 du PIB).
2. La **consommation globale en combustibles de toute nature** est restée pratiquement inchangée, n'augmentant que de 0,1% par an (0,13), le recours aux produits pétroliers diminuant de 1,5% par an, tandis que celui au gaz croissait de 8,0% par an (et qu'apparaissait une contribution limitée venant de l'incinération des déchets et de la distribution de chaleur à distance).
3. L'**augmentation de la consommation totale** provient ainsi de celles en carburants et en électricité (davantage des premiers).
4. Le recours aux carburants s'est accru en moyenne de 2,6% par an (2,63); il a donc augmenté nettement plus rapidement que le PIB (à la puissance 1,7 de ce dernier; pour mémoire: puissance 2 entre 1960 et 1970); *la très forte augmentation du prix du carburant lors de la crise du pétrole n'a donc eu qu'une influence limitée.*

5. Durant la période considérée, la consommation d'**électricité** par habitant a progressé de 3% en moyenne (2,97%), donc pratiquement *avec le carré du PIB/hab.* (puissance 1,93 du PIB); on peut y voir l'effet du remplacement d'une part de combustibles par de l'électricité, mais aussi la conséquence d'une industrialisation accrue (phénomène général à l'échelle mondiale), y compris le développement de l'informatique, de l'automatisation, etc.

6. On remarquera enfin que l'**augmentation de 1,54 % du PIB par habitant s'inscrit dans l'évolution moyenne de 25 ans** environ (1964-1989) au taux moyen de 1,61% par an, malgré les effets successifs de «surchauffe» économique de 1967-1973, puis la forte récession consécutive à la crise du pétrole (1974-1976) et l'à-coup du 2<sup>e</sup> «choc pétrolier» (1981-1983).

## Chapitre 6

# CONSOMMATION SUISSE D'ÉNERGIE DISTRIBUÉE JUSQU'EN 2010

### § a) Evolution de la population suisse

Comme rappelé plus haut, les valeurs indiquées l'étant par habitant, nous devons à présent examiner comment a évolué l'effectif de la population suisse (moyenne annuelle de la population résidante), dans le passé, puis apprécier ce que pourrait être cette évolution durant les 10 ou 20 ans à venir.

La figure 14 montre ce qu'il en a été de 1960 à 1989. En divisant ces 29 ans en quelques périodes caractéristiques, on observe les **taux annuels** de croissance suivants:

|           |         |       |
|-----------|---------|-------|
| 1960-1965 | 2,1 %   | 5 ans |
| 1965-1973 | 1,0 %   | 8 ans |
| 1973-1977 | - 0,4 % | 4 ans |
| 1977-1984 | 0,40%   | 7 ans |
| 1984-1985 | 0,45%   | 1 an  |
| 1985-1986 | 0,60%   | 1 an  |
| 1986-1987 | 0,70%   | 1 an  |
| 1987-1988 | 0,79%   | 1 an  |
| 1988-1989 | 0,78%   | 1 an  |

Ainsi, après la période de haute conjoncture, qui a vu un important afflux d'étrangers et un taux de croissance diminuant progressivement de plus de 2%/an à moins de 1%, la combinaison de la récession (1974-1977) et d'une volonté de limitation de la population étrangère a provoqué le départ d'environ 200 000 personnes («La Suisse exporte son chômage» a-t-on dit). Puis durant 8 ans (1977-1985), la croissance a pu être contrôlée et maintenue au voisinage de 0,4%/an.

Mais, dès 1985, l'arrivée des demandeurs d'asile et le manque de main-d'œuvre provoquent une accélération de la croissance, qui passera progressivement à 0,6%, puis à 0,8%/an.

Qu'en sera-t-il à l'avenir?

L'alourdissement de la conjoncture qui se dessine (1990-1991) va atténuer, tout au moins temporairement, le manque de main-d'œuvre, mais on doit s'attendre à une nouvelle vague de demandeurs d'asile, venant des pays de l'Est: l'attrait d'un pays où le chômage est quasi-nul et le niveau de vie élevé en

sera cause. Il va s'y ajouter l'obligation pour la Suisse d'adhérer ou en tout cas de se rapprocher de la libre circulation des personnes (dans la CEE dès 1993). Il pourrait en résulter une augmentation un peu plus rapide de l'effectif, par exemple au taux de 1,0% par an, (on notera aussi que s'il y a actuellement un net ralentissement dans la construction, dû aux taux d'intérêt élevés et aux coûts des terrains, le manque de logements est patent et il faudra bien trouver, rapidement, des solutions pour y faire face, et relancer ainsi la construction dans ce secteur). On peut douter qu'il soit possible à la Suisse de suivre une politique très restrictive d'accès des étrangers et maintenir un taux de, par exemple, 0,6%/an.

Nous admettrons donc une valeur moyenne de taux de croissance de la population de

0,9%/an de 1980 à 2000  
et 0,8%/an de 2000 à 2010

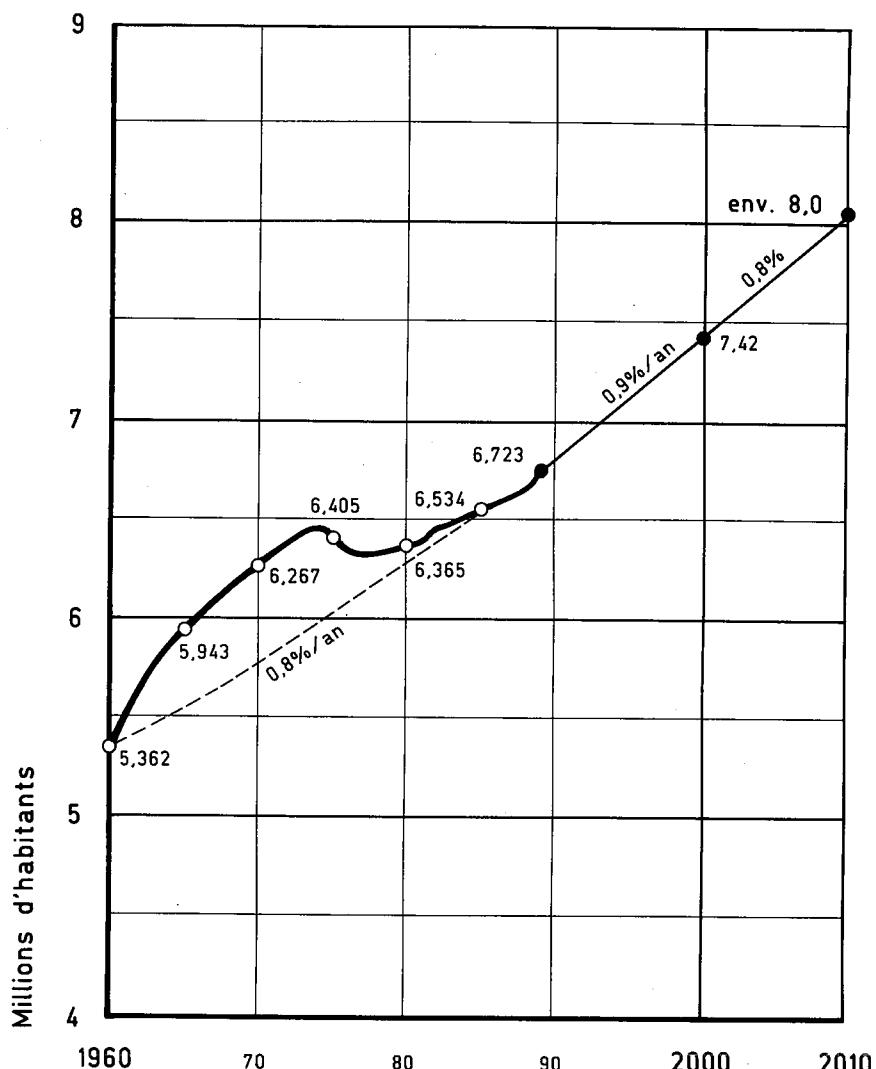
cette légère diminution correspondant à la tendance générale de ralentissement de la croissance démographique dans les pays industrialisés.

### § b) Evolution de la consommation totale d'énergies distribuées

Nous avons ainsi des valeurs probables de tous les paramètres déterminant la consommation totale d'énergies distribuées au cours des 10 à 20 ans à venir (les chiffres sont donnés avec la précision du calcul arithmétique, mais on ne doit pas perdre de vue qu'il ne s'agit que d'estimations).

- PIB/hab., en francs constants, croissance moyenne de 1,3 à 1,5% par an, donc augmentation de 15,3 à 17,8% de 1989 à 2000 et de 31,1 à 36,7% de 1989 à 2010.
- Energie distribuée totale, par habitant, augmentant avec la puissance 0,9 du PIB/hab., donc de 13,7 à 15,9% de 1989 à 2000 et de 27,6 à 32,5% de 1989 à 2010.

Fig. 14  
*Evolution passée et future possible de la population suisse*



c. Population augmentant de 0,9% par an de 1989 à 2000, soit de 10,4%, puis de 0,8% par an de 2000 à 2010, soit de 8,3% (donc de 19,6% de 1989 à 2010).

La consommation totale par habitant passerait ainsi de 115,7 GJ/hab. en 1989 à 130 ou 135 GJ/hab. (131,6 – 134,1) en 2000, et 145 ou 155 GJ/hab. (147,6 – 153,3) en 2010. Compte tenu de l'augmentation de la population, le besoin total en énergies distribuées s'accroîtrait de 778 PJ en 1989 à 970 à 1 000 PJ en 2000 (977 – 995), puis à 1 190 à 1 230 PJ en 2010 (1 187 – 1 232), ou, en arrondissant légèrement

en 2000             $990 \pm 10$  PJ

en 2010             $1210 \pm 20$  PJ

En gros, et compte tenu des nombreuses incertitudes subsistant dans un tel calcul, on retiendra les valeurs vraisemblables suivantes:

|         |                  |
|---------|------------------|
| en 2000 | $1000 \pm 20$ PJ |
| en 2100 | $1200 \pm 50$ PJ |

Ces chiffres ne tiennent apparemment pas compte du résultat des votations du 23 septembre 1990 (mora-toire nucléaire, article constitutionnel sur l'énergie) et

des dispositions que l'autorité fédérale prendra en conséquences (incitations, directives, voire limitations ou interdictions). Nous y reviendrons. Les chiffres indiqués sont donc ceux qui nous paraissent correspondre à une évolution économique probable, mais sans interventionnisme marqué de l'autorité. C'est au moment de l'examen du mode de couverture possible de ces besoins que les conséquences des votations du 23 septembre 1990 interviendront.

### § c) Répartition probable de l'énergie distribuée

Auparavant, il convient encore, à partir de l'analyse faite, de chercher à évaluer comment l'énergie distribuée totale, estimée plus haut, se répartit entre ses divers composants.

En ce qui concerne les **combustibles**, constatant que l'utilisation par habitant n'a augmenté que de 0,1%/an de 1975 à 1989, nous admettrons une croissance nulle jusqu'en 2010, partant de l'idée qu'il y aura légère croissance de la part consommée dans l'industrie, mais réduction équivalente pour le chauffage des locaux (meilleure isolation, etc.). Ainsi l'on en resterait à 56,2 GJ/hab. La population augmentant probablement de 10,4% de 1989 à 2000, et de 19,6% de 1989

à 2010, la consommation en combustibles de toute nature atteindrait 417 PJ en 2000 et 452 PJ en 2010 (comme déjà dit, la précision des chiffres résulte de l'arithmétique, et ne doit pas faire illusion: il ne s'agit que d'estimations).

L'estimation relative aux **carburants** est évidemment plus incertaine. Nous avons vu que durant la période 1974-1989, leur consommation par habitant a évolué avec la puissance 1,7 du PIB, et que cette progression a été peu sensible aux variations notables du coût de ces carburants. On peut espérer que la consommation spécifique des véhicules (litres/100 km) va encore diminuer, mais beaucoup a déjà été fait à cet égard; d'autre part, l'amélioration du niveau de vie (croissance du PIB/hab.), le goût des gens pour les déplacements, l'augmentation du tourisme, sont autant de facteurs qui tendent à maintenir la croissance antérieure. **Néanmoins, nous admettrons un ralentissement de la progression, ramenant celle-ci à la puissance 1,55 du PIB de 1989 à 2000, puis à 1,40 de 2000 à 2010.**

Il y a lieu de tenir compte de l'évolution simultanée du PIB/hab., avec les deux hypothèses faites de croissance de 1,3 ou 1,5%/an, et de l'augmentation de la population. Nous ne donnerons ici, à titre d'exemple, que le calcul correspondant à la croissance du PIB de 1,3%/an. A ce taux, en 11 ans (1989-2000), le PIB sera multiplié par 1,153, ce qui, à la puissance 1,55 donne un facteur de 1,247; multiplié à son tour par 1,104 (population) et par la consommation suisse en carburants de 1989, soit 236 PJ, cela conduit à **325 PJ pour l'an 2000**. De 2000 à 2010, en 10 ans, le PIB/hab. augmentant de 1,3%/an, sera multiplié par 1,138, qui élevé à la puissance 1,40 donne 1,198. **A partir de 1989, la consommation par habitant aura donc été multipliée par 1,247 (ci-dessus) x 1,198, soit 1,494, tandis que la population le sera par 1,196. En appliquant ces deux facteurs à la consommation de 236 PJ en 1989, on trouve 422 PJ pour l'an 2010.**

*Le même calcul, conduit avec une croissance annuelle du PIB/hab. de 1,5%, conduit à 336 PJ en 2000 et 448 PJ en 2010.*

Il est possible de conduire un calcul analogue en ce qui concerne l'**électricité**, troisième composant de la consommation. ***Nous partirons de l'idée que la progression à la puissance 1,9 du PIB, observée de 1975 à 1989, va elle aussi légèrement se ralentir et adopterons un exposant de 1,8 de 1989 à 2000 et 1,7 de 2000 à 2010.*** Cela suppose évidemment que l'électricité n'est pas appelée à accroître sensiblement son rôle de substitut à des combustibles, voire des carburants, ce dont il n'a pas non plus été tenu compte dans les évaluations qui précèdent concernant ces deux composants. Comme déjà dit, cela suppose aussi qu'il n'y aura pas d'entraves anormales à la poursuite d'un approvisionnement suffisant en électricité.

**Dès lors le calcul donne les chiffres suivants (1989: 164 PJ)**

- avec PIB/hab. croissant de 1,3%/an:  
en 2000: 234 PJ en 2010: 316 PJ
  - avec PIB/hab. croissant de 1,5%/an:  
en 2000: 243 PJ en 2010: 340 PJ

***En additionnant maintenant les trois composants de la consommation (combustibles, carburants, électricité), on trouve:***

- en 2000: 976 à 996 PJ/an (selon taux de croissance du PIB/hab.)
  - en 2010: 1190 à 1240 PJ/an.

Ces totaux s'inscrivent bien, puisque les bases générales du calcul sont analogues, dans les estimations faites plus haut pour la consommation totale en énergie distribuée; pour mémoire:

977 à 995 PJ/an avec PIB à 1,3%/an  
1187 à 1232 PJ/an avec PIB à 1,5%/an

**On peut donc retenir, en chiffres arrondis, la répartition probable suivante de l'énergie distribuée:**

| PJ/an                | 1990         | 2000          | 2010          |
|----------------------|--------------|---------------|---------------|
| - combustibles ..... | $380 \pm 10$ | 420           | $450 \pm 10$  |
| - carburants .....   | $250 \pm 5$  | $330 \pm 10$  | $430 \pm 20$  |
| - électricité .....  | $170 \pm 5$  | $250 \pm 10$  | $320 \pm 20$  |
| - Total .....        | $800 \pm 10$ | $1000 \pm 20$ | $1200 \pm 50$ |

Note: Pour obtenir le total arrondi à 1000 PJ en 2000, il a fallu augmenter de 10 PJ l'un des composants; nous avons choisi l'électricité, portée de 240 à 250 PJ/an, vu son rôle déterminant dans les développements industriels et informatiques.

#### **§ d) Appréciation générale**

Certains ne manqueront pas de trouver élevées, voire invraisemblables, les progressions de la consommation totale d'énergies distribuées estimées ici, pas-

sant d'un peu moins de 800 PJ (778) en 1989 à 1000, puis 1200 PJ en l'espace de 10, puis 20 ans. Il s'agit en effet d'augmentation de 29%, respectivement 54%.

Il convient, à cet égard, de ne pas perdre de vue que ***ces progressions correspondent pour une part appréciable*** (10% sur 29, puis 20% sur 54) à la simple augmentation de la population, qui s'accroît de 700 000 personnes, puis 600 000 de plus (1 300 000 de 1989 à 2010). Ces personnes vont évidemment être des consommatrices d'énergie, comme le reste de la

population, que ce soit dans leurs ménages, pour leurs transports ou, pour les personnes actives, aux postes de travail. En outre, la création des logements correspondants et des postes de travail exigera de l'énergie.

Il faut aussi tenir compte de ce que le *niveau de vie de l'ensemble de la population* (mesuré ici par le PIB/hab.) se sera accru d'environ 17% en 2000, respectivement 34% en 2010, en valeurs réelles (francs constants). Les pouvoirs d'achat auront donc notablement augmenté. Quel que soit l'usage fait de ce pouvoir d'achat supplémentaire, on s'aperçoit aisément qu'il entraîne quasi-nécessairement de nouvelles dépenses d'énergie (logements plus spacieux, mieux équipés, déplacements et loisirs, équipements scolaires ou hospitaliers accrus, etc.).

On relèvera enfin que les progressions antérieures comparables (1978-1989 = 11 ans, et 1968-1989 = 21 ans) ont entraîné des augmentations de la *consommation totale* en énergies distribuées de respectivement 15% et 55% (à comparer à 29 et 54%). Mais il s'agissait en moyenne d'une population notamment

moins nombreuse et disposant d'un niveau de vie inférieur. Si l'on compare les énergies totales par habitant, on observe que l'accroissement probable proposé est de 15%, respectivement de 30%, tandis qu'il a été de 9% de 1978 à 1989, et de 42% de 1968 à 1989. On voit ainsi que si la progression proposée en 11 ans (1989-2000) est plus élevée que celle constatée durant les 11 ans précédents, c'est nettement l'inverse si l'on compare des périodes de 21 ans.

Nous pensons donc que, malgré les incertitudes pesant sur les chiffres avancés pour 2000 et 2010, ils constituent des évolutions pour le moins vraisemblables, et même assez probables. Nous les utiliserons donc dans la suite, pour examiner tout d'abord avec quelles sources d'énergies ils pourraient être couverts. C'est une question importante qu'il convient de ne pas éluder sous prétexte que les chiffres sont incertains: les évolutions à cet égard sont relativement lentes, souvent difficiles à mettre en place, ce qui contraint à s'efforcer de voir assez loin et de planifier en conséquence.

## Chapitre 7

# MODES DE COUVERTURE DES BESOINS PROBABLES EN ÉNERGIE DISTRIBUÉE

Les réflexions qui suivent ne sont qu'une esquisse de la manière dont la Suisse pourrait couvrir l'accroissement de ses besoins en énergies distribuées, de 1989 à 2000 ou 2010, avec l'objectif de faire mieux apparaître les questions qui pourraient se poser, et de permettre ainsi de se préparer en conséquence à y faire face.

### § a) Combustibles

Comme déjà indiqué plus haut, le total relatif aux combustibles pétroliers, au gaz, au charbon, au bois, aux déchets industriels et à la chaleur distribuée à distance, s'est élevé à 378 PJ en 1989. *Il s'agit donc d'en disposer de 40 PJ de plus en 2000 et 70 PJ de plus en 2010* (chiffres arrondis).

L'évolution des divers composants au cours des 14 dernières années figure au tableau 15 et donne une indication utile sur les tendances en cours.

On se souvient que les irrégularités dans la succession des totaux sont dues principalement à la combinaison d'années plus chaudes ou plus froides et aux importantes variations du prix de l'huile de chauffage (allant jusqu'à 1 à 3).

Ce qui nous préoccupe ici est d'estimer sur la base de ce tableau à quelles sources d'énergie on pourra faire appel à l'avenir pour disposer des 40 PJ supplémentaires jusqu'en 2000 (et 30 PJ de plus en 2010).

Nous laisserons provisoirement de côté le problème de l'effet de serre, si déterminant qu'il puisse peut-être devenir, et noterons que:

- *il y a peu à attendre du bois:* on a estimé que l'exploitation intensive (mais sans surexploitation) de l'ensemble des forêts suisses pouvait au maximum fournir 40 PJ/an, donc 28 de plus qu'en 1989. Compte tenu de l'organisation (routes, bûcheronnage, commercialisation, etc.) à mettre en place, il semble peu probable qu'on parvienne à dépasser la moitié du total, soit 20 PJ, en 2000, *donc 8 de plus qu'en 1989*, et 30 PJ en 2010, donc 10 sur les 30 à trouver.
- Du fait des nombreuses sujétions liées à son emploi (extraction coûteuse, transport, cendres), et malgré des réserves abondantes, *il paraît douteux que le charbon reprenne une place importante*; mais selon le développement pris par le gaz, on peut supposer que le charbon retrouve en 2000 sa place de 1981 et 1985, soit 20 PJ/an, *6 de plus qu'en 1989*, sans nouvel accroissement en 2010.
- Il est certainement possible de faire *un plus large appel aux déchets industriels*. Un apport de *10 PJ en 2000* ne correspondrait, semble-t-il, qu'à l'utilisation de la moitié de ces déchets. Ceux-ci n'augmenteront pas nécessairement par la suite du fait des efforts systématiques de recyclage que l'on entreprend. Une part de la chaleur dégagée par

| PJ<br>ANNÉE | Combustibles<br>pétroliers | Gaz | Charbon | Bois | Déchets<br>industriels | Chaleur<br>à distance | TOTAL |
|-------------|----------------------------|-----|---------|------|------------------------|-----------------------|-------|
| 1975        | 315                        | 21  | 10      | 8    | 3*                     | 5*                    | 362   |
| 1977        | 313                        | 27  | 11      | 9    | 4*                     | 5*                    | 368   |
| 1979        | 314                        | 28  | 9       | 9    | 4                      | 6                     | 370   |
| 1981        | 285                        | 37  | 20      | 10   | 5                      | 8                     | 365   |
| 1983        | 270                        | 44  | 15      | 11   | 5                      | 9                     | 354   |
| 1985        | 274                        | 53  | 20      | 11   | 6                      | 10                    | 374   |
| 1987        | 285                        | 59  | 16      | 12   | 6                      | 11                    | 389   |
| 1989        | 269                        | 65  | 14      | 12   | 7                      | 11                    | 378   |

Tableau 15  
*Répartition des combustibles*  
*1975-1989*  
(\* estimation de l'auteur)

| PJ   | ANNÉE | 1989 | 2000 | 2010 |
|--|-------|------|------|------|
| Bois   |       | 12   | 20   | 30   |
| Charbon  |       | 14   | 20   | 20   |
| Déchets industriels                                      |       | 7    | 10   | 15   |
| Chaleur à distance (dont                                 |       | 11   | 25   | 40   |
| - production de type actuel:<br>nucléaire, ordures, etc. |       | (11) | (15) | (20) |
| - supplément solaire                                     |       | (-)  | (5)  | (10) |
| - " pompe à chaleur)                                     |       | (-)  | (5)  | (10) |
| Total sans prod. pétroliers<br>ni gaz                    |       | 44   | 75   | 105  |
| Total probable des besoins<br>en combustibles            |       | 378  | 420  | 450  |
| D'où: total prod.pétr. + gaz                             |       | 334  | 345  | 345  |
| Admis: Gaz   |       | 65   | 100  | 135  |
| d'où Prod. pétroliers                                    |       | 269  | 245  | 210  |

Tableau 16  
*Couverture possible des besoins*  
*en combustibles en 2000 et 2010*

leur combustion va, d'autre part, être comptabilisée sous «chaleur à distance».

- On ne saurait assimiler la **chaleur géothermique ou celle tirée d'installations solaires** à des combustibles, mais en les intégrant dans la «**chaleur à distance**» on peut tenir compte de leur apport.

Cet apport restera néanmoins limité, ainsi que cela a déjà été souligné pour le solaire dans la première partie de cet exposé. On estime à l'ordre de 400 000 m la surface des **capteurs solaires** installés à fin 1989 (la majeure partie destinée au séchage du fourrage), en augmentation d'environ 50 000 m par an. Or 100 000 m fournissent l'ordre de 0,5 PJ/an de chaleur. En supposant le maintien d'un rythme de 100 000 m par an, ce sont **5 PJ supplémentaires qui seront à disposition en 2000, et 5 à 10 de plus en 2010**. Par contre l'apport géothermique sera probablement faible (seulement quelques PJ en 2010, p. ex. 1 à 2?), donc négligeable ici.

- Par commodité, on peut enfin additionner ici à la chaleur à distance celle fournie par les **pompes à chaleur**, dite «**chaleur tirée de l'environnement**». Rappelons qu'il ne s'agit en fait que de la valorisation d'énergie de haute qualité (électricité, travail mécanique), qui est multipliée pratiquement par un facteur d'environ 3 lorsqu'elle est transformée en chaleur à basse température (pour le chauffage p. ex.). Mais on doit souligner que **l'opération n'a d'intérêt que si l'énergie de qualité n'a pas été obtenue par un combustible** (centrale électrique thermique) ou un carburant (moteur à explosion), la production de cette énergie de qualité se faisant alors avec un rendement d'environ 1/3: le bilan de l'opération complète est donc nul (et il y a maintien de la production de gaz de combustion à effet de serre). La généralisation de l'utilisation de pompes à chaleur n'a ainsi de sens que si l'électricité employée provient de l'hydraulique, du nucléaire (nettement trop cher avec le solaire). Cela suppose donc qu'on dispose par ailleurs d'électricité en quantité suffisante. Nous ferons néanmoins cette supposition (ces dernières années, il a été installé 3000 à 4000 pompes à chaleur par an, mais généralement de petites puissances, et il y en a 40 000 en service en 1989). En admettant qu'il puisse s'agir en 2000 de 150 000 pompes à chaleur d'une puissance électrique moyenne de 2 kW (ou 10 000 de 30 kW), **la production de chaleur atteindrait 5 PJ. Ce pourrait être le double en 2010.**

- Pour la «**chaleur à distance**» actuellement distribuée (11 PJ en 1989), elle provient pour une part notable des centrales nucléaires, dont on sait qu'il n'est pas envisagé d'en accroître le nombre avant 2000; l'incertitude règne pour les 10 ans suivants. Une autre part a des origines différentes (incinération d'ordures, p. ex.) et peut être développée encore. De 1983 à 1989, l'augmentation de cette chaleur à distance a été de 2 PJ en 6 ans.

- **Compte tenu de tous les éléments qui précèdent, on peut imaginer, pour la «chaleur à distance» une production telle que celle qui figure au tableau 16;** elle suppose une ferme volonté de développement (visant notamment la limitation du recours aux combustibles fossiles).

- On obtient ainsi le tableau d'ensemble 16.

Si discutables qu'elles puissent être dans le détail, les évaluations qui figurent au tableau 16 font apparaître que si les efforts imaginés peuvent être réalisés en ce qui concerne le bois, le charbon, et surtout la «chaleur à distance» (y compris solaire et pompes à chaleur), **les besoins cumulés en combustibles pétroliers et gaz n'augmenteraient pas, se stabilisant au voisinage de 340 PJ/an. Si le recours au gaz peut continuer à se développer, alors celui aux combustibles pétroliers pourrait diminuer, passant en chiffres ronds de 270 PJ en 1989 à 210 PJ en 2010. Ce serait une évolution bienvenue, car, à coup sûr, le besoin de produits pétroliers en tant que carburants ne va pas manquer de croître.**

Il faut cependant relever la part importante des combustibles producteurs de gaz à effet de serre: près de 378 PJ/an actuellement, 410 en 2000 et 430 en 2010 (seules les parts «solaires» et «pompes à chaleur» n'en produisent pas).

## § b) Carburants

Nous avons vu que les besoins en carburants, qui ont été de 236 PJ en 1989, pourraient s'élever à 330 PJ en 2000 et 430 PJ en 2010, donc près de 100 PJ de plus dans 20 ans.

S'il ne paraît pas y avoir lieu de craindre que l'on en vienne à manquer, à l'échelle mondiale, des hydrocarbures correspondants (en tout cas pas dans ce délai), **cette progression n'en soulève pas moins d'importantes questions en ce qui concerne la pollution atmosphérique** (effet de serre, ozone, hydrocarbures). Certes, la généralisation des catalyseurs semble devoir atténuer ces effets pernicieux (encore que des doutes existent à ce sujet: maintien de l'efficacité dans le temps, augmentation de la consommation de carburant, accroissement de certains rejets).

Certains comptent sur le **développement de la voiture électrique**; il nous paraît cependant peu probable que celle-ci prenne une place significative dans le parc automobile d'ici 10 à 20 ans (faible autonomie, vitesse limitée, coût). Et il faut souligner que, comme pour les pompes à chaleur, elle ne présente d'intérêt que si la recharge des batteries n'est pas faite avec de l'électricité provenant de centrales électriques thermiques (mais de centrales hydrauliques ou nucléaires).

**Seul un fort accroissement du transport par le rail serait en mesure de diminuer l'augmentation du recours aux carburants.** Le ferroutage apporte un élément positif, mais limité principalement au trafic commercial, et surtout de transit. L'agrément de la voiture individuelle, par la liberté qu'elle donne (pour le travail mais aussi pour les déplacements de loisir, sans parler d'aspects psychologiques) est si grand qu'il ne sera certainement pas facile d'en restreindre l'emploi et d'éviter une augmentation du parc des voitures proportionnelle à celle de la population.

La très forte augmentation du prix des carburants suite à la crise du pétrole en 1973 (environ 50% de plus) n'a produit qu'une diminution de consommation inférieure à 5%.

Chacun constate que la limitation des vitesses maximales autorisées est en grande partie sans effet. Les conducteurs adaptent leurs vitesses surtout aux possibilités de la route et de la circulation plutôt qu'aux règlements. Les gains de temps, sur la route et grâce à l'indépendance par rapport aux lieux (gares) et aux horaires, ces gains de temps sont aussi très souvent des gains d'argent; même s'ils ne sont pas chiffrés, les conducteurs en sont conscients.

Dans la prévision de consommation rappelée plus haut, on a déjà essayé de tenir compte d'une diminution de la rapidité de la croissance dans le domaine des carburants, conséquence des perfectionnements technologiques, mais aussi d'une certaine saturation du réseau routier, et de l'amélioration des services offerts par le rail (fréquence, confort). Mais il pourrait être illusoire d'en attendre davantage. Certaines pollutions atmosphériques ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HC}$ ) peuvent probablement être encore réduites, mais l'utilisation d'hydrocarbures se traduira toujours par le rejet de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{H}_2\text{O}$ , qui restent des gaz à effet de serre.

Il reste que l'on peut réduire le recours aux moteurs fixes (mais leur part est faible) par une plus grande utilisation de l'électricité, mais cela suppose à nouveau qu'il existera une disponibilité suffisante en cette dernière.

Il résulte des indications qui précèdent que le **recours total aux produits pétroliers** suivrait l'évolution suivante:

|                | <u>1989</u> | <u>2000</u> | <u>2010</u> |
|----------------|-------------|-------------|-------------|
| - carburants   | 236         | 330         | 430 PJ      |
| - combustibles | 269         | 245         | 210 PJ      |
| Total          | 505         | 575         | 640 PJ      |

soit une croissance moyenne de 1,1% par an, faible, mais cependant pas négligeable.

## § c) Electricité

### c1. Exportation et importation

Alors que les carburants consommés sont importés (ou tirés directement de pétrole importé) et qu'il en est de même de la quasi-totalité des combustibles (la production indigène, bois et déchets, ne couvrant qu'environ 5% de la consommation), la situation est notablement différente en ce qui concerne l'électricité. La production indigène dépasse nettement la consommation et il y a donc exportation d'électricité; c'est d'autant plus le cas qu'à certains moments la Suisse importe du courant ce qui accroît les exportations à d'autres moments. Cette situation, à première vue paradoxale, exige une explication.

**La cause en est la difficulté qu'il y a à stocker les excédents momentanés de la production.** La seule possibilité à l'échelle de ces excédents consiste à les utiliser à pomper de l'eau dans un lac en altitude et à l'y stocker, puis, lorsqu'on a besoin de l'électricité, à turbiner cette eau.

L'opération est onéreuse, financièrement du fait du coût de l'installation de pompage-turbinage (intérêts

et amortissement du capital investi, frais d'exploitation), et énergétiquement car le rendement global n'excède pas 65 à 70% (pertes de charge dans les conduites, rendement des pompes, turbines, moteurs et alternateurs).

**Les charges financières ne sont supportables que si le cycle pompage-turbinage se répète suffisamment souvent dans l'année:** stockage de nuit et turbinage de jour, ou entre week-end et jours ouvrables; il est d'un coût prohibitif s'il s'agit de stocker de l'énergie d'hiver pour disposer d'énergie en hiver (un cycle annuel supportant seul toute la charge financière).

Alors que la consommation est plus élevée en hiver, la production hydraulique au fil de l'eau (centrales sur des rivières) est plus forte en été. **La Suisse dispose donc d'excédents importants en été, et manque d'électricité en hiver, surtout aux heures de pointe de la consommation.** Il serait naturellement possible de laisser passer l'eau sans la turbiner aux heures creuses, notamment en été, l'énergie correspondante étant alors perdue. Mais il est plus avantageux de produire cette électricité et de l'exporter (à un prix réduit); elle permet à des pays voisins de réduire leur production dans des centrales thermiques, dont le combustible est cher. Le revenu acquis diminue le prix de l'électricité consommée en Suisse.

**Une situation analogue existe en ce qui concerne les centrales nucléaires**, dont le combustible est bon marché et dont le courant excédentaire peut être vendu avantageusement à l'étranger; au surplus, l'arrêt d'une centrale nucléaire et sa remise en marche sont des opérations complexes, prenant du temps, et qui ne se justifient pas pour un week-end par exemple. Même si les arrêts annuels (pour maintenance et recharge en combustibles) sont planifiés en été, il y a un excès de production qu'il est intéressant d'exporter. Si la production d'une centrale nucléaire correspond, en moyenne annuelle, à 7000 h à pleine puissance (80% du temps; moyenne suisse 1989: env. 84%), elle fournira 25 PJ pour 1000 MW de puissance électrique; une part de cette production pourra être stockée à court terme par pompage-turbinage (p. ex. 5 PJ), mais une part sera exportée (p. ex. 5 PJ).

**Si la Suisse importe du courant, ce n'est bien entendu pas aux mêmes heures que celles où elle exporte, mais parce qu'elle manque de courant en heures de pointe, surtout en hiver; ces importations permettent d'éviter de construire des installations qui ne seraient utilisées que pendant ces heures de pointe.** Néanmoins c'est bien le rôle que jouent les lacs d'accumulation: on y stocke de l'eau en été (sans avoir besoin de l'y pomper) pour la turbiner en 1000 ou 2000 h de pointe, surtout en hiver, mais ces possibilités d'accumulation n'existent qu'en nombre limité et sont presque toutes déjà mises à contribution.

Il est vrai qu'à côté de ces importations nécessitées par les besoins suisses et ces exportations avantageuses (pour les collectivités publiques qui détiennent environ les 9/10 des sociétés suisses d'électricité), il peut se présenter des possibilités d'opérations purement commerciales: achat de courant bon marché en excès chez un voisin et permettant d'économiser les réserves d'eau accumulées pour vendre ensuite de

l'énergie de pointe à haut prix lors de pénuries aiguës chez un autre voisin, au profit financier des consommateurs suisses. Mais ces exportations «commerciales» restent limitées.

*On voit ainsi clairement que l'affirmation, maintes fois répétées dans les milieux écologiques que, pour se passer du nucléaire, il suffit de réduire les exportations, ne correspond nullement aux possibilités réelles. Cette affirmation ne peut résulter que d'une profonde méconnaissance des mécanismes de l'économie électrique* (ou de la mauvaise foi, car on ne peut que s'étonner beaucoup de la trouver dans la bouche d'écologistes ayant par ailleurs des responsabilités importantes dans cette économie).

Le solde net des exportations varie fortement d'une année à l'autre selon «l'hydraulicité» (précipitations, fonte des neiges et glaces), ainsi qu'on le voit dans les colonnes 1 à 3 du tableau 17. Durant les 15 années précédentes (1975-1989), ce solde a été minimal en 1976 (7 PJ) et 1989 (9 PJ) et maximal en 1977 (37 PJ), 1981 et 1982 (39 PJ) et 1988 (35 PJ).

L'une des préoccupations majeures de l'économie électrique suisse a été donc jusqu'ici de pouvoir garantir aux consommateurs suisses la couverture de

leurs besoins en heures de pointe d'hiver, avec une marge de sécurité minimale (pour le cas d'un arrêt intempestif d'une installation notable, mais également pour faire face aux incertitudes de l'hydraulicité et de la consommation, p. ex. en année froide) afin d'éviter alors une coupure de courant importante. Il est juste de relever que jusqu'ici ce but a été atteint.

Note: On remarque sur le tableau 17

- la diminution de la production hydraulique en année d'hydraulicité faible: 110 PJ en 1989 contre 133 PJ en 1982,
- l'accroissement de la production nucléaire en 1988 (77 PJ) par rapport à 1982 (51 PJ) dû à l'entrée en service de la centrale de Leibstadt,
- la forte augmentation des importations en année d'hydraulicité faible (25 PJ de plus en 1989 qu'en 1988),
- les pertes notables (18 PJ en 1989), dues en partie (5 PJ) à celles occasionnées par les cycles de pompage-turbinage.

## c2. Couverture des besoins supplémentaires

Passer de 164 PJ d'électricité distribuée en 1989 à 250 PJ en 2000, puis 320 PJ en 2010 suppose de notables disponibilités supplémentaires: 80 à 90 PJ en 2000 et 150 à 160 PJ en 2010.

| ANNÉE<br>Hydraulicité : | 1<br>1982<br>forte | 2<br>1988<br>bonne | 3<br>1989<br>faible | 4<br>2000 | 5<br>2010 |
|-------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------|-----------|
| <b>PRODUCTION</b>       | PJ                 |                    |                     |           |           |
| Hydraulique             | 133                | 131                | 110                 | 130       | 140       |
| Nucléaire               | 51                 | 77                 | 77                  | 80        | 150       |
| Thermique               | 4                  | 4                  | 4                   | 30        | 40        |
| Prod. indigène          | 188                | 212                | 191                 | 240       | 330       |
| Importation             | 32                 | 54                 | 79                  | 130       | 130       |
| <b>TOTAL</b>            | 220                | 266                | 270                 | 370       | 460       |
| <b>UTILISATION</b>      | PJ                 |                    |                     |           |           |
| Distribué               | 132                | 159                | 164                 | 250       | 320       |
| Pertes                  | 17                 | 18                 | 18                  | 30        | 40        |
| Consommé                | 149                | 177                | 182                 | 280       | 360       |
| Exporté                 | 71                 | 89                 | 88                  | 90        | 100       |
| <b>TOTAL</b>            | 220                | 266                | 270                 | 370       | 460       |

Tableau 17  
*Production et utilisation de l'électricité.*  
*Exemples de bilans annuels passés et possibles pour 2000 et 2010*

En outre, puisque nous parlons maintenant de production, il faut ajouter à l'énergie distribuée les pertes de transport et de distribution, ainsi que celles faites dans les cycles de pompage-turbinage (30 à 35 % de l'énergie stockable), ces dernières augmentant si l'on multiplie les installations de pompage-turbinage dans le but de diminuer les exportations (et les importations). Le total de ces pertes a progressé de 9 % en 1983 à 11 % en 1989.

Elles pourraient se situer à l'ordre de 30 PJ en 2000 (et 40 PJ en 2010), portant la production nécessaire à 280 PJ (250 + 30) en 2000, et à 360 PJ (320 + 40) en 2010. Le supplément de production qui devrait être disponible en 2000 serait ainsi de 100 PJ (280 - 180), et de 180 PJ (360 - 180) en 2010, soit 80 PJ de plus qu'en 2000.

Pour fixer les idées, on peut calculer aisément à quelle puissance installée supplémentaire cela correspond. En supposant qu'il s'agisse d'installations de production fonctionnant à pleine puissance 7 000 h par an, soit 80 % du temps (cas possible pour une centrale thermique ou nucléaire), il faudrait disposer de la production d'installations nouvelles totalisant une puissance électrique de 4 000 MW jusqu'en 2000, puis 3 200 MW supplémentaires de 2000 à 2010 (au total 7 200 MW, soit l'équivalent de 5 à 6 centrales telles que les récentes centrales nucléaires françaises).

***De quelles possibilités dispose-t-on pour faire face à ce probable accroissement de la demande? On peut les énumérer comme suit:***

- augmentation de la production hydraulique indigène,***
- développement de sources nouvelles (solaire, éolienne ou autres),***
- mise en service de centrales thermiques (à combustibles fossiles: gaz, charbon, p. ex.),***
- mise en service de centrales nucléaires (dans les limites fixées par la Constitution),***
- augmentation des importations.***

***Si la production d'électricité provenant des installations hydrauliques*** est influencée par les conditions d'«hydraulicité» propres à chaque année, la puissance des installations existantes n'a que très peu augmenté au cours des 10 dernières années: 11,41 MW en 1980, 11,54 MW en 1989. Durant ces 10 ans, la production a été maximale durant l'année hydrologique 1982-83 (133 PJ) et minimale en 1989-90 (110 PJ); en moyenne, pour ces 10 ans: 123 PJ.

L'accroissement de cette production hydraulique peut être obtenue par la modernisation d'installations existantes (ce qui se poursuit, mais ne se traduit que par des apports supplémentaires limités) et par la réalisation d'aménagements hydroélectriques nouveaux. Les possibilités à cet égard sont restreintes car le potentiel hydraulique suisse est déjà très largement mis en valeur (env. 90 %), et les aménagements restant à faire sont naturellement ceux qui soulèvent le plus de problèmes (techniques, ou de rentabilité, ou d'atteintes à l'environnement).

On en prendra pour exemple l'aménagement du Rhône valaisan jusqu'au Léman, dit projet «Hydro-Rhône»; il comporte 10 barrages dont la production annuelle totale pourrait atteindre 3 PJ. Etudié depuis plusieurs années, il n'a pas encore été possible de mettre en chantier le premier de ces 10 barrages du fait des oppositions (fondées ou non) qu'il soulève. Au mieux, on peut espérer l'achèvement de ce projet dans 20 ans.

***Il a été estimé que l'ensemble des possibilités offertes (modernisations et réalisations nouvelles) pourrait conduire à un accroissement maximal de 10 % de la production hydraulique, soit 12 PJ/an.*** En supposant ce qui est certainement optimiste, que la majeure partie en soit faite en 2000, on disposerait ainsi de ***10 PJ*** de plus à la fin du siècle. Puis en postulant un effort supplémentaire particulier entre 2000 et ***2010***, peut-être pourrait-on encore tirer de l'hydraulique ***10 PJ de plus*** (donc 20 PJ entre 1990 et 2010). Mais cela suppose un notable changement d'attitude des milieux opposants (et probablement une modification de la législation afin de limiter l'usage abusif des possibilités d'opposition).

***Il faut malheureusement reconnaître que le développement du recours à des sources d'énergie nouvelles (solaire, éolienne ou autre), si souvent mis en avant par certains, ne peut apporter que des suppléments négligeables à l'échelle des besoins.***

S'agissant du ***solaire***, on notera que la mise en service d'ici 2000 (sans égard au coût) de 20 centrales analogues à celle de Mont-Soleil (dont il a été question plus haut) n'apporterait que 1 PJ de plus (et 5 PJ pour 100 centrales en 2010) sur les 100 PJ que nous cherchons.

L'***énergie éolienne*** peut sembler plus séduisante puisqu'une seule hélice de 50 m de diamètre (ce qui n'est pas négligeable) fournit la même puissance maximale que la centrale entière de Mont-Soleil. Mais la puissance effective varie avec le cube de la vitesse du vent, et les vents faibles à modérés sont les plus fréquents en Suisse. La mise en service d'une centaine de ces grandes éoliennes sur des sites favorables (forts vents fréquents mais ne nécessitant pas de longues lignes de transport) pourrait apporter 0,5 PJ supplémentaires, ce qui, de nouveau est négligeable ici.

***Il n'en est évidemment pas de même en ce qui concerne le recours possible à des centrales thermiques.*** A cet égard, on peut probablement écarter d'emblée l'usage d'huile lourde ou de charbon comme combustibles, à la fois pour des raisons de pollution atmosphérique et de coût, et n'envisager ici que le cas le plus favorable, celui du ***gaz naturel***.

En admettant 6000 h par an de fonctionnement à pleine puissance (production réduite ou stoppée en heures creuses), la ***production d'électricité est de 2 PJ pour 100 MWe installés***. Si des 100 PJ à trouver pour l'an 2000, on suppose que 10 PJ proviendraient de l'hydraulique, il reste 90 PJ qui, s'ils sont uniquement obtenus de centrales thermiques, conduisent à mettre en service 4 200 MWe, donc ***l'équivalent de 14 centrales de 300 MWe chacune*** (pour comparaison: centrale à huile lourde de Chavalon: 300 MWe). Cela paraît réalisable si l'on fait abstraction d'oppositions écologiques.

ques ou autres susceptibles de beaucoup retarder les constructions, et si l'on néglige les rejets de CO<sub>2</sub> correspondants (moindres toutefois qu'avec de l'huile ou du charbon, sans parler de la production de cendres avec le second). On remarquera cependant que des quelques projets envisagés ces dernières années, aucun n'a abouti pour le moment.

**Pour 2010, il s'agirait alors de produire par des centrales thermiques environ 160 PJ (180 – 20 hydraulique), donc d'installer entre 2000 et 2010 une dizaine de centrales supplémentaires de 300 MWe en moyenne** (l'utilisation du gaz permettrait sans doute de mettre en place quelques unités moins puissantes (100 à 150 MWe), décentralisées dans des régions à plus faible densité de consommateurs, et quelques plus grandes unités (400 à 600 MWe) ailleurs.

**Mais il va de soi qu'une telle politique irait à l'encontre d'une volonté de stabiliser ou réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O).**

**De ce point de vue, seul le recours à l'énergie nucléaire permet d'atteindre le but.** Une telle centrale, de 1300 à 1500 MWe, produit annuellement 35 PJ d'électricité. **Il suffirait dès lors d'en mettre trois en service jusqu'en 2000** (ce qui interdit le moratoire), puis deux autres entre 2000 et 2010.

Mais deux observations s'imposent: des 35 PJ produits par centrale, environ 10 le sont à des heures (nuit, week-end, été) durant lesquelles on dispose de suffisamment d'électricité. Ces 10 PJ doivent donc être ou stockés ou exportés. S'ils sont exportés, ils sont perdus pour la consommation suisse. Quant à être stockés, il n'existe que la possibilité d'utiliser cette énergie à pomper de l'eau derrière un barrage (site à trouver ...) pour la turbiner en heures de forte consommation; une exportation partielle paraît donc inévitable, ce qui conduit à devoir augmenter un peu les importations ou la puissance installée en Suisse (ce dont il a été tenu compte dans le tableau 17).

**Augmenter fortement les importations de courant reste en principe une possibilité, à condition évidemment de trouver des pays voisins exportateurs, aux heures où la Suisse aura besoin de cette électricité.** Mais s'il s'agit de courant produit dans ces pays par des centrales thermiques, on n'a fait que déplacer le lieu d'émission des gaz à effet de serre, et l'on doit bien imaginer que d'ici 10 à 20 ans une politique supra-nationale sera mise en place à cet égard. La question serait différente s'il s'agissait de production hydraulique, mais il ne reste guère de potentiel disponible en Europe voisine. **Seule une origine nucléaire est donc écologiquement acceptable, et à cet égard seule la France est actuellement exportatrice d'une telle production: la Suisse importe déjà la production de 2 1/2 centrales françaises. Peut-on concevoir l'importation de la production de 5 centrales nucléaires françaises vers 2000, puis de 7 centrales vers 2010? Cela soulève pour le moins plusieurs questions:**

- L'opinion publique et les autorités françaises accepteront-elles que soient ainsi situées sur leur sol les centrales nucléaires dont les Suisses ne veulent pas?

– Une aussi forte dépendance à l'égard d'un seul voisin dans un secteur énergétique dont le bon approvisionnement est capital pour la marche de notre économie ne comporte-t-elle pas un risque politique exagéré? (possibilités de pressions dans d'autres domaines, ou d'obligations pour la France de donner la priorité à la satisfaction de besoins de partenaires plus proches, etc.).

– La puissance considérable qui transiterait à travers notre frontière Ouest conduirait à la nécessité de lignes à haute tension importantes pour acheminer ce courant vers les centres suisses de consommations.

– Le traitement des déchets radioactifs et leur stockage ne devraient-ils pas être assumés par la Suisse, voire la fourniture du combustible, et même peut-être le financement de tout ou partie de l'investissement (comme c'est déjà le cas)?

Compte tenu de la perte de contrôle de la production (p. ex. sûreté, grèves), et des postes de travail (et de la compétence technologique) **on peut légitimement se demander si un tel type d'importation d'électricité nucléaire étrangère comporte finalement un réel avantage par rapport à une production en Suisse.**

Il va de soi que **les possibilités évoquées peuvent être combinées**, par exemple de la manière indiquée aux colonnes 4 et 5 du tableau 17. On y a prévu qu'aucune nouvelle centrale nucléaire n'entrerait en service jusqu'en 2000, puis que deux de ces centrales seraient construites entre 2000 et 2010, ce qui suppose une évolution de l'opinion publique suisse. La production thermique (au gaz naturel) resterait alors limitée à 30 PJ en 2000 (1400 MW, ou 5 centrales d'environ 300 MW) et 40 PJ en 2010 (1900 MW, ou 6 centrales), ce qui devrait être acceptable. La part exportée est augmentée en 2010 pour tenir compte du surplus produit par les 2 centrales nucléaires.

On remarquera que si l'importation croît notablement de 1990 à 2000 (passant de 80 à 130 PJ), elle ne progresserait plus après, grâce à la construction des 2 centrales nucléaires prévues.

**Il est par ailleurs évident que les besoins croîtront progressivement de 2000 à 2010 et que la nécessité de disposer d'une première centrale nucléaire apparaîtra vers 2005 déjà.** Or la réalisation d'une telle centrale peut exiger une dizaine d'années (4 à 5 d'études, de procédures d'autorisation, d'appels d'offres et adjudications, 4 de construction et 1 de mise en service). Rien de concret ne pouvant être réalisé avant 2000 du fait du moratoire, on voit qu'il sera temporairement nécessaire de faire un appel accru à l'importation (p. ex. 40 à 50 PJ de plus vers 2005), avec tout ce que cela implique (voir plus haut). On peut même se demander si une société d'électricité prendra le risque d'engager avant 2000 les études nécessaires pour que les procédures puissent démarrer dès l'expiration du moratoire (une ou plusieurs centaines de millions de francs). **Cela fait ressortir le fait connu que le moratoire déplorera des effets de blocage bien au-delà de l'an 2000.**

Il est sans doute important de rappeler ici que les prévisions de consommation faites plus haut le sont

dans l'optique d'une croissance normale de l'économie suisse, donc non entravée par des priorités marquées données par exemple à des préoccupations écologiques ou d'indépendance énergétique. En d'autres termes, il a été fait abstraction des possibilités offertes par une application nettement restrictive du nouvel article constitutionnel sur l'énergie.

On ne perdra pas non plus de vue que l'évolution envisagée n'est que probable; elle suppose que se poursuive une croissance économique à l'échelle mon-

diale, sans crise grave ou prolongée. A l'inverse, on ne saurait a priori exclure une demande d'électricité dépassant celle estimée ici: plus forte croissance de la population suisse, plus forte volonté (et plus urgente) de substitution de l'électricité aux combustibles fossiles (effet de serre), meilleure conjoncture économique générale vers 2000 – 2010, etc.. Il va de soi, enfin, que tous les chiffres ne sont qu'approximatifs et destinés à donner l'ordre de grandeur des évolutions vraisemblables.

## Chapitre 8

# DÉCISIONS POPULAIRES DU 23 SEPTEMBRE 1990 ET CONSÉQUENCES

### § a) Les limitations que peut envisager l'Autorité fédérale

Le 23 septembre 1990, se prononçant sur trois initiatives qui lui étaient soumises, le peuple suisse a

- d'une part, pris position quant au recours à l'énergie nucléaire, refusant, à une faible majorité, de décider dès maintenant de s'en priver à l'avenir, mais acceptant une disposition constitutionnelle interdisant la réalisation de toute nouvelle installation de production dans les 10 ans à venir (moratoire),
- d'autre part, introduit un article constitutionnel donnant à la Confédération de larges possibilités d'intervention visant à limiter la consommation d'énergie en général, grâce notamment à une utilisation plus rationnelle et lui permettant de soutenir la promotion de sources nouvelles (solaire, etc.).

Il semble ne pas y avoir de doute quant au fait que l'autorité fédérale entend faire respecter le moratoire et faire usage des possibilités dont elle dispose maintenant pour:

- *Limiter strictement*, et jusqu'en 2001, *la production nucléaire* au niveau actuel.
- *Limiter la consommation générale d'énergie*, que ce soit par incitation aux économies (notamment grâce à la mise en place d'installations plus performantes, permettant une utilisation plus rationnelle) et encouragement de la lutte contre tous les gaspillages, voire par usage de réglementations diverses, contraignantes.
- *Limiter la dépendance à l'égard de l'étranger*, en soutenant le développement du recours à de nouvelles sources indigènes (solaire, éolienne, géothermique, etc.) et en s'efforçant d'empêcher l'accroissement des importations de combustibles fossiles, de carburants et notamment d'électricité.
- *Limiter la consommation d'électricité*.

- *Limiter l'émission de gaz à effet de serre*, donc la consommation de combustibles fossiles et de carburants.

Ce qui nous intéresse ici est d'apprécier quelles incidences cette volonté fédérale (conséquence de la volonté populaire exprimée le 23 septembre 1990) pourra avoir sur l'évolution probable des besoins suisses évalués plus haut et sur leur mode de couverture. *Il s'agit donc d'estimer si les cinq limitations indiquées ci-dessus sont compatibles entre elles, et si elles peuvent être poursuivies sans mettre exagérément en danger l'économie suisse dans son ensemble, compte tenu de la volonté simultanée d'accroître la contribution des énergies nouvelles renouvelables.*

Ou, au contraire, l'autorité fédérale a-t-elle reçu ce qu'on pourrait appeler une «mission impossible»? et dans cette éventualité auxquelles des limitations convient-il de donner la priorité?

La question est complexe car il y a interaction entre les diverses mesures possibles: par exemple, un moyen efficace de réduire la consommation de combustibles est la promotion des pompes à chaleur, mais alors la consommation d'électricité augmente.

### § b) Quelques observations générales

*Une première observation*, fondamentale, nous paraît s'imposer:

*Limiter la consommation d'énergie ne constitue nullement un but en soi*: peu importe que la Suisse en consomme peu ou beaucoup, seules les conséquences de cette consommation ont de l'importance, telles que atteintes à l'environnement, dépendance de l'étranger, dangers accrus, etc.. A l'appui de cette affirmation, prenons le cas de l'énergie solaire: toute celle

qui n'est pas captée est perdue; mais la production d'électricité par voie photovoltaïque a un faible rendement (10 à 20%); par conséquent plus on en produit, plus la consommation totale du pays croît; et pourtant cela permet de diminuer le recours aux combustibles, ce qui est désirable. Une volonté de limitation générale de la consommation d'énergie ne paraît donc pas constituer une priorité, mais bien la limitation du recours à des sources entraînant pollutions, dangers, etc..

**Une deuxième observation** peut être la suivante: *est-il plus important*, donc prioritaire, de *limiter la dépendance à l'égard de l'étranger*, en particulier pour ce qui est de l'importation d'électricité, ou de *limiter l'émission de gaz à effet de serre*? Certes, le recours accru à l'importation (d'électricité, de combustibles ou de carburants) rend la Suisse plus vulnérable politiquement et économiquement, mais peut-on considérer que cette préoccupation est prioritaire (au sein d'une Europe qui s'intègre et où les échanges vont croissant) par rapport à la probabilité notable d'une dramatique évolution climatique due à l'effet de serre, aux conséquences incalculables (écologiques, économiques, humaines, politiques)?

**Une troisième observation vise la volonté générale d'économiser l'énergie.** Quant au principe, cette volonté est une impérative nécessité, non pour elle-même – on l'a dit – mais pour ses conséquences positives. Mais il en est ici tout comme en gestion financière: il faut vouloir économiser, mais pas n'importe où et n'importe quand: bien gérer c'est aussi savoir parfois dépenser, mais à bon escient. Lutter contre les gaspillages est indispensable, étant admis que par «gaspillage» on entend des dépenses énergétiques que l'on peut éviter sans inconvenient appréciable, telles que surchauffe de locaux, ou usage de la voiture là où le train rend le même service, etc.. Mais lorsqu'il s'agit de remplacer un système moins performant par un autre qui l'est davantage, un bilan doit être établi: de combien le coût de l'énergie va-t-il être grevé par l'investissement à faire, et ce surcoût est-il raisonnable? Surtout, l'opération va exiger une dépense énergétique au niveau de la fabrication et de l'installation du nouveau système (y compris l'énergie incluse dans les heures de travail, c'est-à-dire l'énergie consommée par les travailleurs: logement, nourriture, transport, loisirs, etc.); y aura-t-il finalement une réelle économie d'énergie? En améliorant l'isolation thermique d'un immeuble, on détermine aisément la chaleur de chauffage qui sera ainsi économisée, mais en général on ne se préoccupe guère de l'investissement énergétique que l'opération comporte au total. On pourrait en dire autant pour de nombreux appareils ménagers.

Cela nous conduit à une **quatrième observation: cet effort systématique d'amélioration des installations énergétiques entraînera, à l'échelle du pays, une dépense totale considérable**. Quelles en seront les conséquences économiques? Les charges financières des entreprises (et des collectivités publiques et des particuliers) en seront accrues, ce qui pourrait diminuer leur compétitivité; poussé trop loin, ou trop rapidement, cet effort peut se traduire par la perte de postes de travail. Cette question mérite d'autant plus

d'attention au moment où l'intégration européenne va accroître la concurrence que doivent affronter les entreprises suisses, et à laquelle s'ajoute l'effet d'une conjoncture économique générale qui s'alourdit (il ne faut pas s'y tromper: la Suisse supportera sa part du considérable appui que l'Occident va devoir apporter à l'Europe de l'Est, URSS comprise et aussi sa part du coût de la guerre du Golfe). Des mesures fédérales trop fermes, tombant dans une période de difficultés économiques, renforceraient la baisse prévisible de la prospérité générale et contribueraient à l'accroissement d'un chômage, heureusement faible pour l'instant (mais qui n'en est pas moins un dramatique fléau social dont la limitation est peut-être la priorité des priorités).

**Une cinquième observation concerne la signification à donner au terme «limitation».** Nous avons compris qu'il s'agit, dans l'esprit des autorités fédérales, de parvenir d'ici à l'an 2000 à stabiliser les consommations d'énergie au niveau qu'elles auront alors atteint (combustibles, carburants, électricité) (pas plus de combustibles, de carburants ou d'électricité), ou de s'efforcer de limiter, dans la mesure du possible, leurs accroissements? Si le PIB par habitant continue de croître lentement, en valeurs réelles, que feront alors les Suisses du supplément de pouvoir d'achat qui n'entraîne pas des dépenses d'énergie nouvelles?

Il faut en outre tenir compte ici de l'augmentation de la population, dont il a été question plus haut, qui ne saurait être négligée à moyen terme. Rappelons que si le PIB/hab. augmente de 1,5%/an et la population de 1,0%/an et que la consommation d'énergie distribuée y soit proportionnelle, cette consommation aura augmenté des 2/3 dans 20 ans; mais c'est très probablement un maximum. Avec un PIB/hab. ne croissant que de 1,3%/an, une population n'augmentant que de 0,8%/an, et une consommation d'énergie ne progressant qu'à la puissance 0,8 du PIB, la consommation totale ne s'accroîtrait que de 1/3.

Nous pensons que la seule énergie nouvelle renouvelable qui puisse apporter une contribution sensible à l'approvisionnement énergétique du pays est l'énergie solaire; et pour les raisons évoquées plus haut, (étendue des surfaces nécessaires, répartition dans le temps, difficulté de stockage, coût), il nous paraît illusoire d'imaginer que cette contribution sera réellement significative (5 à 10 PJ sur 100 à 200 PJ d'augmentation, soit 5%). Seul un développement très intensif du chauffage à distance, avec installations «chaleur-force» et pompes à chaleur, pourrait permettre de stabiliser le recours aux combustibles. Il nous semble donc difficile d'imaginer qu'il sera possible de limiter fortement l'augmentation de la consommation totale d'ici l'an 2000, et de la supprimer au-delà de cette date.

C'est dès lors à influencer le choix entre les modes de couverture que l'action fédérale devra sans doute s'orienter. Il apparaît ainsi la nécessité de fixer les priorités.

### § c) Les priorités

Ce choix des priorités pourrait, de notre point de vue, se présenter comme suit:

**1<sup>re</sup> priorité: maintenir en Suisse une prospérité générale suffisante**, donc une certaine croissance économique, au minimum une augmentation annuelle de 1% du PIB/hab. (en valeurs réelles), de manière à maintenir un taux de chômage bas (max. 1%), et à permettre les investissements nécessités par la volonté d'améliorer le système énergétique.

En conséquence, éviter un interventionnisme excessif de l'Etat (coûteux en lui-même, pas nécessairement adéquat, et lourd pour les organismes visés).

**2<sup>e</sup> priorité: se préparer à devoir probablement limiter, puis stabiliser voire restreindre, les émissions de gaz à effet de serre**, et s'attendre à devoir s'aligner, à cet égard, dans le cadre d'une concertation internationale d'ici 10 ou 20 ans. Or, la consommation totale suisse d'énergie continuant nécessairement à croître, cette priorité impose la recherche et la mise en œuvre des possibilités de remplacement de combustibles et de carburants par des sources non polluantes (hydraulique, nucléaire, solaire, etc.). Il s'agira pour l'essentiel de disposer de plus d'électricité; sa consommation croît déjà sans utilisation en remplacement de combustibles ou de carburant, a fortiori si l'on y recourt pour limiter l'augmentation de l'utilisation de ces derniers.

**3<sup>e</sup> priorité: assurer un approvisionnement sûr et suffisant en électricité**, à des prix acceptables. L'hydraulique ne pouvant assurer qu'environ 1/10<sup>e</sup> de l'augmentation des besoins, le solaire et les autres sources nouvelles ne pouvant jouer qu'un rôle négligeable, **seule l'importation et le nucléaire entrent ici en ligne de compte**. L'accroissement à court terme de la production nucléaire étant interdite par le moratoire, c'est essentiellement sur l'augmentation de l'importation qu'il faudra compter, ce qui n'exclut pas de faire temporairement un appel limité à la production par des centrales thermiques à gaz, alors même que cela est en contradiction avec la 2<sup>e</sup> priorité. On voit ainsi qu'une volonté fédérale de limiter ces importations ne serait pas réaliste.

**4<sup>e</sup> priorité: constater qu'à moyen terme (10 à 20 ans et au-delà) seul le nucléaire permet de satisfaire aux priorités précédentes.** Il en résulte la nécessité d'un très gros effort pour faire évoluer l'opinion publique et la convaincre que les dangers du nucléaire sont parfaitement maîtrisables et que par ailleurs cette forme d'énergie offre des avantages considérables.

### § d) Lutte contre l'effet de serre, recours à l'électricité et au nucléaire

La question de l'approvisionnement en électricité et celle de la position à l'égard du nucléaire sont liées, et méritent quelques réflexions supplémentaires. C'est la forte réticence de l'opinion publique suisse à l'égard du nucléaire qui a conduit à l'acceptation du moratoire, et c'est cette situation, jointe au désir de

limiter les importations de courant pour ne pas accroître la dépendance énergétique du pays, qui semble devoir conduire l'autorité fédérale à vouloir limiter la consommation d'électricité.

*Or la seule possibilité de limiter par ailleurs les émissions de gaz à effet de serre, donc le recours aux combustibles et aux carburants, est précisément un accroissement de l'emploi de l'électricité. Il y a donc une contradiction fondamentale entre les deux volontés de limitation, celle d'émission des gaz à effet de serre et celle d'importation d'électricité.*

S'agissant de l'effet de serre, c'est surtout l'utilisation des combustibles qu'il faut viser. On peut naturellement les remplacer dans pratiquement tous leurs usages par le recours à l'électricité, ce qui n'a cependant de sens, on l'a dit, que si cette dernière n'est pas produite par des centrales thermiques à combustibles fossiles. La substitution directe de l'électricité à ces combustibles serait absurde puisque de 1 PJ de pouvoir calorifique d'un combustible on ne tire que 0,4 PJ d'électricité, qui ne dégage que 0,4 PJ de chaleur dans un corps de chauffe; mieux vaut brûler le combustible dans un foyer remplaçant le corps de chauffe (ce qui explique l'opposition au chauffage des immeubles à l'électricité).

La situation est améliorée par le recours aux pompes à chaleur, déjà évoqué, puisqu'elles permettent de tirer 1 PJ à 1,5 PJ de chaleur (de l'«environnement») du 0,4 PJ d'électricité à disposition. Mais là encore le bénéfice est quasi-nul si l'électricité provient de centrales thermiques.

*Il faut donc, si l'on veut économiser du combustible, utiliser avec des pompes à chaleur de l'électricité provenant d'installations ne dégageant pas de gaz à effet de serre.* On a déjà vu ce qu'il en est des possibilités limitées offertes par l'hydraulique, et de celles, négligeables, à attendre des sources autres que le nucléaire.

Nous avons vu que la consommation en carburants, d'environ 240 PJ/an actuellement, pourrait atteindre 330 PJ/an en 2000 et 430 PJ/an en 2010. Seule une faible part de cette consommation est le fait de moteurs fixes qui pourraient être remplacés par des moteurs électriques (estimation 1989: 4 PJ).

*Si l'on voulait que la consommation conjointe en combustibles et carburants n'augmente pas (pas d'accroissement des émissions de gaz à effet de serre), il faudrait que celle en combustibles diminue de l'augmentation de celle en carburants, donc de 90 PJ de 1990 à 2000 et de 190 PJ de 1990 à 2010 (sans tenir compte des éventuelles centrales thermiques).* La consommation en combustibles devrait ainsi diminuer de 380 PJ en 1989 à 290 PJ en 2000 (au lieu d'augmenter à 420 PJ, soit 130 PJ de moins) et à 190 PJ en 2010 (au lieu d'augmenter à 450 PJ, soit 260 PJ de moins). En supposant que tout le combustible à économiser soit remplacé par de la chaleur dite tirée de l'environnement, donc fournie par des pompes à chaleur, ayant un coefficient de performance moyen de 3, il en résulterait un accroissement du recours à l'électricité d'environ 45 PJ en 2000 et 90 PJ en 2010; compte tenu de pertes (transport, distribution) de

10%, la production d'électricité (importations comprises) devrait augmenter de 50 PJ en 2000 et 100 PJ en 2010.

A cette échelle, *il s'agirait principalement de la réalisation d'importants réseaux de chauffage à distance*, avec production centralisée de chaleur par agglomérations ou quartiers d'habitation. Cela ne paraît pas irréalisable, au moins en notable proportion en 2010. Ce serait d'autant plus opportun si à cette date de nouvelles centrales nucléaires entraient en service, une importante puissance thermique pouvant être soutirée à basse température (100-150 °C) directement à la centrale (comme c'est déjà le cas pour certaines des centrales nucléaires suisses actuelles).

*Mais on pourrait aussi envisager la réalisation de réseaux alimentés par des réacteurs nucléaires de chauffage*, de puissances limitées (20 à 100 MW p. ex.), dont l'étude et le développement ont déjà été entrepris en Suisse. Cependant ces développements, faits avec l'appui de la Confédération, ont été stoppés par l'introduction du moratoire; ils ne pourront donc être repris que dans 10 ans (et on doit beaucoup le regretter) et ne pourraient le cas échéant devenir opérationnels que dans 15 ou 20 ans...

*Entre-temps, c'est l'accroissement correspondant des importations d'électricité qui apparaît comme la seule possibilité ouverte, aux conditions déjà mentionnées. Ainsi les importations mentionnées au tableau 17 passerait de 130 PJ prévus à 180 PJ en 2000 et 230 PJ en 2010 (p. ex. production d'une dizaine de centrales nucléaires françaises...).*

Ce calcul présente ce qu'on pourrait appeler le cas maximal. En effet, il est encore trop tôt pour décider d'une stabilisation complète du recours aux combustibles fossiles; nous avons nous-même admis plus haut un recours limité au gaz pour la production d'électricité. Mais ce calcul souligne que si l'on met en priorité la lutte contre l'effet de serre, la consommation d'électricité augmentera audelà de celle évaluée plus haut. Il souligne aussi l'impossibilité d'éviter des importations notables de courant tant que des installations nucléaires ne pourront pas être réalisées en Suisse (centrales électriques ou réacteurs de chauffage). *C'est pourquoi la 4<sup>e</sup> priorité évoquée* (recherche d'un consensus en faveur du nucléaire) *est importante; et elle est urgente, car il n'est pas certain que les importations actuelles d'électricité nucléaire française pourront prendre l'ampleur envisagée.*

Il n'y a pas de raison pour qu'une information claire et objective, largement diffusée, ne parvienne pas à convaincre le peuple suisse que la votation du 23 septembre 1990 en faveur du moratoire a été une grave erreur, qu'il convient de rectifier, et le plus tôt sera le mieux. Mais ce ne sera pas une tâche facile, et elle passe par *l'analyse des raisons de la forte réticence à l'égard du nucléaire*.

### § e) Quelques remarques sur les aspects psychologiques et politiques des questions évoquées

Nous nous sommes efforcés, tout au long de cet exposé, de nous maintenir, de façon réaliste, dans le domaine technico-économique. Qu'il nous soit permis d'en sortir un instant dans ce dernier paragraphe.

Sans tenter de faire ici une analyse exhaustive de la réticence d'une partie du public à l'égard du nucléaire, il est cependant possible et, pensons-nous, utile de dégager *quelques éléments essentiels*; on y trouve:

- l'assimilation, généralement subconsciente, entre l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire et l'angoisse, justifiée, de son emploi militaire, terrifiant,
- l'ignorance ou la connaissance très imparfaite des phénomènes physiques en jeu, ce qui donne un caractère quelque peu mystérieux à cette énergie, et engendre une certaine crainte,
- la difficulté pour beaucoup de gens de s'adapter à une société en évolution technologique rapide, provoquant une réaction naturelle de rejet,
- le sentiment que les décisions dans ce domaine échappent au contrôle populaire, en oubliant que l'économie électrique est quasicomplètement propriété des collectivités publiques.

A tous ces éléments compréhensibles, vient s'ajouter la volonté de certains milieux d'exploiter cette situation pour se profiler politiquement en se donnant l'apparence de protecteurs contre les abus d'un capitalisme seulement soucieux d'intérêts matériels et faisant bon marché des risques encourus par le peuple. Que de nombreux écologistes puissent croire de bonne foi que le nucléaire est dangereux ne doit pas surprendre; c'est ce qu'on leur dit. Ce qui, par contre, est très décevant est d'entendre des responsables de ces milieux, personnes intelligentes et averties, tenir des propos évidemment inexacts (deux exemples de déclarations faites avant le 23 septembre: «Pour se passer du nucléaire, il suffit de réduire nos exportations d'électricité» et «Nous n'avons pas besoin du nucléaire puisque nous avons le solaire»; on a vu plus haut ce qu'il en est en réalité).

Ce qui déçoit encore davantage est de voir les responsables de l'un des principaux partis politiques gouvernementaux soutenir (et même lancer) les deux initiatives antinucléaires. On ne peut se défendre d'y voir une tactique à but électoraliste, qui oublie l'intérêt général, que pourtant un parti aussi important devrait avoir seul devant les yeux. Ce parti a pris là une lourde responsabilité, dont l'économie suisse en général paiera les conséquences (et probablement tout particulièrement les travailleurs).

Ces prises de position politiques, leurs responsables n'ont pas hésité à les justifier par la crainte inspirée par la possibilité de la répétition en Europe occidentale d'un accident analogue à celui de Tchernobyl, alors qu'ils auraient dû savoir (ou savaient?) qu'aucun parallèle ne peut être fait de bonne foi entre le réacteur RBMK soviétique et les réacteurs occidentaux, et

négligeaient les circonstances très particulières de l'accident. C'est l'arrêt des RBMK que l'on aurait éventuellement pu réclamer, mais non celui des centrales suisses.

On a ainsi délibérément induit la population suisse à fortement surévaluer les risques du nucléaire, ne tenant pas compte des appréciations faites dans les autres pays (dont les responsables ne sont certainement pas aveugles), et qui se sont traduites par la mise en œuvre de plus de 50 nouvelles centrales depuis l'accident de Tchernobyl (40 nouvelles centrales projetées au Japon pour l'an 2000). Sans vouloir ici diminuer en rien la gravité exceptionnelle de cet accident, on doit aussi noter la large diffusion donnée à des informations douteuses quant aux conséquences sur la population avoisinante (on pense notamment à la campagne orchestrée en faveur des enfants leucémiques de la région, dont il semble que la maladie n'est pas en relation avec l'accident).

Et quel rapport faire objectivement entre les centrales suisses et le surgénérateur Superphénix, d'un type totalement différent? Prototype, et à ce titre objet de nombreux incidents, mais sans conséquences pour le personnel ou l'environnement, même s'il apparaît inutilement puissant eu égard au ralentissement économique général consécutif à la crise du pétrole; faut-il ici rappeler que la mise au point ou l'exploitation d'une dizaine d'autres surgénérateurs se poursuit dans d'autres pays, étant donné la probable nécessité de cette voie à long terme.

Beaucoup pourrait être ajouté ici dans cet ordre d'idées, mais il n'est pas inutile de mentionner le cas de la Suède, qui a pris il y a quelques années la décision – qu'on nous proposait – d'abandonner définitivement le nucléaire, (dont elle n'a pas moins de 12

centrales). Maintenant que la date approche où cette décision devrait se traduire concrètement (1995), on assiste à un revirement de l'opinion, syndicats et parti socialiste en tête. Les conséquences économiques d'un tel abandon apparaissent graves et le recours accru aux combustibles fossiles suffisamment inquiétant pour qu'il soit demandé en Suède, que l'on abroge la décision d'abandon (la décision a été prise de reporter sine die la date du début de l'opération d'abandon du nucléaire).

Signalons enfin que l'une des principales organisations écologiques américaines a reconnu récemment qu'elle n'était plus opposée au nucléaire, y voyant le moyen de mieux protéger l'environnement.

Ces réflexions nous ont paru nécessaires ici pour souligner le caractère artificiel de l'opposition au nucléaire suscitée en Suisse par certains milieux, par une information tendancieuse (dictée semble-t-il par des intérêts politiques à courte vue).

*Il devrait donc être possible de convaincre la population suisse que l'on peut placer les exigences de sécurité au niveau qu'on estime nécessaire (qu'il s'agisse de fonctionnement ou de déchets), sans incidence inacceptable sur les coûts*, tandis qu'il est impossible de brûler des combustibles sans dégager de grandes quantités de gaz à effet de serre. De la convaincre aussi que le maintien d'une prospérité suffisante, sans dépendance excessive de l'étranger, passe par une production indigène d'électricité satisfaisant aux besoins de développement du pays (remplacement de combustibles, informatisation, accroissement de la population, etc.) et que cela ne peut être réalisé à moyen terme que par la mise en service de nouvelles installations nucléaires (donc par l'abrogation du moratoire dès que possible).

## Chapitre 9

### CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Elles sont présentées ci-après sous forme d'un résumé de l'exposé qui précède.

#### D'une manière générale:

1. La volonté des individus d'améliorer leur condition d'existence, celle des entreprises de se développer et celle des collectivités de progresser, poussent à une vigoureuse croissance économique, indispensable aussi pour lutter contre le fléau qu'est le chômage.

Quoique avec de notables différences dans le détail il y a, en gros, proportionnalité entre le niveau de vie d'une population, mesuré ici par le PIB/hab., et sa consommation d'énergie (au-delà de la proportionnalité si l'on considère le pouvoir d'achat).

A cela s'ajoute l'effet de l'augmentation générale de l'effectif des populations; ces deux causes d'accroissement (niveau de vie, population) se multiplient l'un par l'autre.

2. A l'échelle des énormes besoins d'énergie des grandes collectivités (pays, monde entier) les seules sources d'énergie qui jouent un rôle déterminant sont les combustibles fossiles (plus des 9/10 en 1990 au niveau mondial, soit environ 30% charbon, 40% pétrole, 25% gaz), le nucléaire de fission et l'hydraulique. Les autres sources sont négligeables à cette échelle, certaines pouvant cependant prendre une part marginale (moins de 10% au total) dans une cinquantaine d'années.
3. Les réserves et ressources en combustibles fossiles sont largement suffisantes pour faire face, à elles seules, aux besoins énergétiques mondiaux

du prochain demi-siècle, et au-delà. Il en est de même pour le nucléaire de fission, à condition qu'une partie des réacteurs soient des surgénérateurs. Les possibilités de l'hydraulique restent nettement limitées. La fusion nucléaire offre de très intéressantes perspectives, sans limite quant aux ressources, mais ne jouera pas de rôle significatif avant la seconde moitié du 21<sup>e</sup> siècle. Il en sera de même d'éventuelles nouvelles découvertes ou inventions. Les possibilités offertes par le solaire sont décevantes: très grandes surfaces nécessaires (énergie faible au m<sup>2</sup>), répartition défavorable dans le temps, durée annuelle de fonctionnement limitée, stockage saisonnier impossible pour la chaleur et d'un coût prohibitif pour l'électricité, coût très élevé.

4. L'usage des combustibles fossiles dégage inévitablement d'énormes quantités de gaz, rejetés dans l'atmosphère. Le réchauffement de celle-ci par effet de serre est une réalité physique incontournable (phénomène irréversible). Par contre, la nature et l'ampleur des conséquences climatiques, écologiques, agricoles, etc. ne sont encore que des estimations qui restent à préciser. On doit cependant tenir pour probable que l'on devra dans les prochaines décennies stabiliser l'usage de ces combustibles puis ultérieurement le réduire.
5. Le recours au nucléaire de fission s'est largement développé ces dernières décennies (env. 450 réacteurs commerciaux en service, dont 50 depuis Tchernobyl); l'expérience cumulée porte ainsi sur environ 10 000 années-réacteurs, avec en Occident un seul accident grave (Three Mile Island, USA, 1979) sans conséquences autres que matérielles. Mais la poursuite de ce développement est actuellement entravée car certaines populations estiment qu'il comporte des risques inacceptables, en particulier à la suite du très grave accident de Tchernobyl (1986). Cette opposition résulte de la méconnaissance du cas très particulier de Tchernobyl (réacteur RBMK qui n'existe qu'en URSS, jugé inacceptable en Occident, essais très spéciaux conduits par un personnel étranger à la centrale, ayant mis hors service les dispositifs de sécurité, etc.), sans rapport avec les installations occidentales; méconnaissance aggravée par une désinformation délibérée à buts politiques. Quant aux surgénérateurs, dont il existe une dizaine dans le monde, il s'agit encore de prototypes; ils seront nécessaires (dans 20 ou 30 ans) si le nucléaire doit remplacer temporairement les combustibles fossiles et il n'y a pas de raison de ne pas leur imposer une sûreté égale à celle des autres réacteurs.
6. Si, comme cela semble probable, les craintes relatives aux très graves conséquences de l'émission de gaz à effet de serre se confirment, et qu'il faille stabiliser puis réduire le recours aux combustibles fossiles, seul le nucléaire de fission permettra de faire face aux besoins énergétiques à grande échelle. Or rien n'empêche de fixer les exigences de sécurité (fonctionnement et déchets) du nucléaire à des niveaux jugés acceptables, si

élevés soient-ils. C'est sur la détermination de ces niveaux, et à leur réalisation, que l'effort doit porter, et non sur l'interdiction du nucléaire, ce qui en bloque le développement alors que cette source sera peut-être indispensable. Il est impératif que l'option nucléaire reste ouverte.

## Au niveau mondial:

7. On doit s'attendre à voir passer la population mondiale de 5,2 milliards actuellement, à 9 à 10 milliards dans une cinquantaine d'années (vers 2040), le taux annuel d'accroissement diminuant cependant de 1,8% à 1% environ. Compte tenu d'une élévation moyenne limitée du niveau de vie dans les pays industrialisés (25% de la population mondiale, mais consommant 80% de l'énergie) et du faible accroissement de leur population, compte tenu d'autre part de la forte démographie des pays en voie d'industrialisation (40% de la population mondiale, 15% de l'énergie) et de la rapide élévation de leur niveau de vie, compte tenu enfin du rôle limité joué par les pays moins développés, on peut estimer que la consommation mondiale totale en énergie primaire passera de 300 EJ actuellement à 800 + 100 EJ vers 2040. La moitié de cet accroissement de 500 EJ sera le fait des pays en voie d'industrialisation (que les pays industrialisés devront aider pour des raisons tant politiques qu'économiques, voire éthiques).

8. Ainsi, vers 2040, la consommation mondiale pourrait se répartir, en gros, comme suit, dans les pays:

|                                 |                                      |
|---------------------------------|--------------------------------------|
| A. industrialisés:              | 400 EJ/1,7 G.hab.<br>(1990: 230/1,3) |
| B. en voie d'industrialisation: | 300 EJ/3,7 G.hab.<br>(1990: 60/2,0)  |
| C. moins développés:            | 100 EJ/4,0 G.hab.<br>(1990: 20/1,9)  |

(EJ: exajoules, G.hab.: milliards d'habitants)

Les sources d'énergie pourraient être à cette époque, compte tenu des limitations dues à l'effet de serre:

|                           |  |
|---------------------------|--|
| – combustibles fossiles:  | 300 EJ (1990: 280)                         |
| – nucléaire de fission:   | 400 EJ (10)                                |
| – énergies renouvelables: | 80 EJ (10)<br>(hydraulique, solaire, etc.) |
| – fusion nucléaire:       | 20 EJ (-)                                  |

## Cas de la Suisse:

9. La Suisse ne représente que

1‰ de la population mondiale

2‰ des produits nationaux bruts

3‰ de la consommation totale d'énergie.

Ce que feront, ou ne feront pas, les Suisses sera donc sans effet sur la situation mondiale, mais l'évolution de cette dernière sera déterminante pour le pays.

10. La population résidant en Suisse croît actuellement au taux de 0,8%/an. Ce taux pourrait encore augmenter à l'avenir (intégration européenne, réfugiés). Même en le supposant maintenu à 0,8 – 0,9%/an, on doit prévoir une population de 8 millions dans 20 ans (6,8 M.hab. en 1990) (M.hab.: millions d'habitants). Ces 1 200 000 habitants supplémentaires consommeront de l'énergie.

11. Le niveau de vie, mesuré par le PIB/hab., a progressé en moyenne de 1,5%/an depuis 25 ans (davantage de 1983 à 1989). On doit donc prévoir la poursuite de la croissance de ce PIB/hab., au moins de 1,3 à 1,5%/an.

La consommation d'énergie distribuée, par habitant, a, dans le passé, augmenté nettement plus vite que le PIB/hab. Elle lui a été quasi-proportionnelle depuis 1983 et a même été inférieure dès 1986 à 1989.

12. Compte tenu de ces éléments (augmentation de la population, élévation du niveau de vie, progression plus faible de la consommation par habitant) on peut estimer à 1000 + 20 PJ le besoin en énergies distribuées en 2000, et 1200 + 50 PJ en 2010 (1989: 778 PJ). Sans intervention étatique (ou autre) particulière, la répartition pourrait être la suivante, en PJ/an (PJ: pétajoule ou million de milliards de joules):

|                | 1989 | 2000 | 2010 |
|----------------|------|------|------|
| – combustibles | 378  | 420  | 450  |
| – carburants   | 236  | 330  | 430  |
| – électricité  | 164  | 250  | 320  |

13. En ce qui concerne les combustibles, et compte tenu d'efforts visant à un plus grand recours au bois, aux déchets, à la distribution de chaleur à distance (y compris pompes à chaleur et solaire), la répartition pourrait être, en PJ/an:

|   | 1989 | 2000 | 2010 |
|---|------|------|------|
| – produits pétroliers                     | 269  | 245  | 210  |
| – gaz                                     | 65   | 100  | 135  |
| – autres (bois, chaleur à distance, etc.) | 44   | 75   | 105  |

Le total du recours aux produits pétroliers (combustibles et carburants) n'en augmenterait pas moins de manière sensible (PJ/an): 514 575 640

14. Pour faire face à l'accroissement des besoins en électricité (155 PJ de plus en 20 ans), l'hydraulique ne sera en mesure d'apporter que 10 à 20 PJ/an. Le solde doit provenir soit de la production de centrales thermiques à construire (utilisant du gaz) ou de centrales nucléaires nouvelles (constructions interdites pour 10 ans par le moratoire voté le 23.09.1990), soit d'une augmentation des importations. La réduction des exportations (proposée par les opposants au nucléaire) ne peut être que limitée: la Suisse exporte des suppléments de production à des heures durant lesquelles il n'y a pas preneurs en Suisse et qui seraient perdus sans cela. Ces exportations rendent service à des pays voisins, et en contrepartie la Suisse peut importer de l'électricité qui lui man-

que en heures de pointe (ce qui évite des constructions supplémentaires dans le pays); le stockage en Suisse des excès de production se pratique par turbinage-pompage, mais n'est d'un coût acceptable que pour des cycles courts (journaliers, hebdomadaires) mais non saisonniers (été-hiver), et suppose que l'on ne s'oppose pas systématiquement à la réalisation des installations correspondantes (lacs artificiels et barrages).

15. L'accroissement notable des importations (inévitable tant que l'on ne pourra pas construire en Suisse de nouvelles centrales nucléaires, et si l'on veut limiter le nombre des centrales thermiques à combustibles fossiles) n'est envisageable que par l'achat du courant de centrales nucléaires françaises.

C'est déjà le cas pour 2 1/2 de ces centrales, et il en faudrait porter le total à 7 environ en 2010 si l'on ne veut pas de centrales thermiques (importation de combustible et effet de serre). Ce serait une évolution présentant de nombreux et sérieux inconvénients, à supposer même que la France s'y prête.

Il faut ajouter à ce qui précède que si l'on devait déjà d'ici 20 ans limiter le recours aux combustibles (effet de serre), cela ne pourrait se faire que par un appel accru à l'électricité (pompes à chaleur et chauffage à distance).

16. On voit ainsi apparaître une contradiction fondamentale existant au sein des limitations qui paraissent visées par les autorités fédérales en conséquence des décisions populaires du 23.09.1990:

- limitation au niveau actuel et jusqu'en 2001 de la production nucléaire (moratoire),
- limitation générale de la consommation d'énergie (ce qui n'est pas un but en soi, rappelons-le),
- limitation de la consommation d'électricité,
- limitation des importations, notamment d'électricité (pour mieux protéger l'indépendance du pays),
- limitation de la production de gaz à effet de serre.

17. Il faudra donc fixer des priorités, qui pourraient être:

- maintenir une prospérité générale suffisante et cela malgré des perspectives économiques peu favorables à court terme, donc accepter une progression limitée du PIB/hab. malgré un accroissement de la population,
- assurer pour cela un approvisionnement suffisant en électricité, donc prévoir un notable accroissement des importations et la construction d'un nombre limité de centrales thermiques (à gaz) tant que celle de centrales nucléaires n'est pas envisageable,
- se préparer à devoir probablement limiter les émissions de gaz à effet de serre (combustibles, carburants), ce qui accroîtra les besoins en électricité,

- développer intensivement les réseaux de chauffage alimentés par des centrales «chaleur-force» avec pompes à chaleur,
- convaincre la population suisse qu'il n'y a pas de commune mesure entre les conséquences probables, très graves et irréversibles, de l'effet de serre et le fait d'exiger un niveau de sûreté jugé acceptable dans le nucléaire (fonctionnement et déchets). L'option nucléaire, à laquelle on sera probablement obligé de recourir, à l'échelle mondiale, doit rester ouverte (et le moratoire abrogé aussitôt que possible de manière à pouvoir maîtriser les importations).

18. Pour mémoire, rappelons les compléments faisant l'objet des notes annexes, qui soulignent notamment:
  - la non-cohérence des bases statistiques (Annexe A),
  - la nécessité de recourir au concept de l'exergie (Annexes G, H et J) pour localiser correctement les pertes et apprécier leur ampleur,
  - l'important effort souhaitable en ce qui concerne particulièrement les installations de chauffage («chaleur-force», pompes à chaleur, Annexes G et J).

Bénéficier d'une prospérité – qu'on nous envie – avec un très faible chômage, et d'énergie en suffisance sans mettre en danger l'environnement, cela fait aussi partie de la qualité de la vie.

Lausanne, février 1991



## ANNEXE A

# QUALITÉ ET COHÉRENCE DES STATISTIQUES ÉNERGÉTIQUES

### § 1. Généralités

Les consommations d'**énergie primaire** utilisées dans la 1<sup>re</sup> partie de l'étude proviennent des statistiques de l'Organisation des Nations Unies, certainement établies avec grand soin. Il va de soi qu'il y est veillé à ce que les mêmes méthodes de calcul soient employées pour les divers pays concernés, afin d'obtenir des chiffres comparables entre eux.

Mais il faut en outre qu'il y ait une cohérence suffisante entre les manières dont sont établies les énergies provenant de sources différentes. En effet, la part de chaque source varie, parfois fortement, d'un pays à l'autre; la sous-estimation, par exemple, du rôle d'une source ne provoque pas la même diminution relative du total dans des pays différents, et en modifie donc la comparaison. De même, si le rôle de cette source change notablement au fil des années dans un pays donné, l'évolution de la consommation s'en trouve modifiée. Cette question de cohérence dans les définitions mérite donc un bref examen.

S'agissant de la Suisse, et des statistiques de consommation d'**énergie distribuée** (finale) utilisée dans la 2<sup>e</sup> partie de l'étude, nous pouvons nous poser des questions analogues.

L'énergie consommée vise en définitive à fournir un certain service au consommateur; c'est l'**énergie utile**. Là aussi, il est nécessaire de vérifier la cohérence des définitions.

Une **politique énergétique** peut poursuivre des buts divers, par exemple de diminution des coûts, ou celle des atteintes à l'environnement, ou d'économie des ressources, ou d'indépendance. Mais, à services rendus égaux, la **diminution des pertes**, au cours du passage de l'énergie primaire à l'énergie utile, constituera toujours un avantage si le coût de l'opération est acceptable (coût financier, énergétique ou autre). Cela exige tout d'abord que ces pertes soient correctement localisées et mesurées, et cela ne sera le cas que si les diverses énergies sont elles-mêmes définies de façons cohérentes.

Les réflexions qui suivent ne se prétendent pas exhaustives; elles visent surtout à montrer la nature des questions que l'on peut poser et à permettre ainsi d'évaluer la qualité des bases statistiques utilisées.

### § 2. Energie primaire

A première vue, la détermination de l'énergie primaire consommée par un pays ne soulève pas de difficulté. En moyenne mondiale, il s'agit pour 95 % environ de l'énergie des **combustibles fossiles** (charbons, pétrole, gaz naturel) extraits des gisements ou importés, ainsi que des dérivés importés. Il suffit d'additionner les quantités de chaleur que la combustion de ces produits pourra dégager. Ces chaleurs spécifiques sont déterminées en laboratoire dans des conditions bien définies et optimales de combustion avec de l'air; elles sont délivrées à des températures maximales voisines (températures de flamme: environ 2200 K).

On obtient ainsi un «**pouvoir calorifique**» par unité de masse, différent d'un combustible à l'autre selon la proportion de carbone et d'hydrogène qu'il contient (l'oxydation de l'hydrogène dégageant plus de chaleur que celle du charbon, plus il y a d'hydrogène, plus élevé est le pouvoir calorifique). En chiffres arrondis, il s'agit de 30 MJ/kg pour le charbon, 45 MJ/kg pour le pétrole et ses dérivés, 50 MJ/kg pour le gaz.

Ce pouvoir calorifique est dit «**supérieur**» (PCS) parce qu'il comprend la chaleur qui sera libérée lors de la condensation de la vapeur d'eau ( $H_2O$ ) produite par la combustion de l'hydrogène inclus. Or, en pratique, cette chaleur de condensation ne sera pas disponible, la vapeur d'eau produite s'échappant dans l'atmosphère avec les autres gaz de combustion. Le combustible ne vaut ainsi qu'un pouvoir calorifique **inférieur** (PCI), plus faible que le PCS dans la proportion d'environ 7 % pour un produit pétrolier et 10 % pour du gaz naturel (constitué principalement de méthane CH<sub>4</sub>). Sans être importante, la correction n'est pas négligeable et elle va s'accroissant au fil des années, au fur et à mesure que le charbon est remplacé par du pétrole, puis par du gaz; elle va en outre différer d'un pays à l'autre.

Cependant le calcul de l'énergie primaire soulève une question plus délicate au moment d'y intégrer les énergies hydraulique et nucléaire, dont les proportions varient sensiblement d'un pays à l'autre (p. ex., en 1980, l'hydraulique fournissait 2 % de l'électricité produite dans le Royaume-Uni, et 100 % en Norvège). Dans les statistiques de l'ONU, on se borne à ajouter l'électricité ainsi produite, dite **électricité primaire**, aux

## A 2

autres énergies primaires, et c'est ainsi qu'ont été établis les chiffres mentionnés dans la présente étude (notamment aux figures et tableaux 1, 2 et 3, et dans l'Annexe B).

Or, la majeure partie de l'électricité mondialement produite l'est, dans les centrales thermiques, à partir des combustibles faibles, avec un rendement moyen voisin de 40%. Il en résulte que pour avoir 1 EJ d'électricité on devrait disposer soit de 1 EJ d'électricité primaire (d'origine hydraulique ou nucléaire) soit de 2,5 EJ de combustible (qui, avec un rendement de transformation de 40%, donnent aussi 1 EJ d'électricité).

Faut-il dès lors, dans le calcul de l'énergie primaire totale consommée, multiplier par 0,4 la part des combustibles qui sera ultérieurement transformée en électricité, ou faut-il multiplier par 2,5 (inverse de 0,4) l'électricité primaire?

Partant de l'idée que l'électricité n'est pas à proprement parler une énergie primaire (l'énergie primaire tirée de l'environnement est en fait l'énergie hydraulique ou celle de l'uranium, «combustible nucléaire»), c'est la multiplication par 2,5 qui est généralement retenue, dite «**valorisation**» de l'électricité primaire; cette dernière est dès lors comptée pour le combustible fossile qu'elle est censée permettre d'économiser.

Cette manière de procéder a le mérite de tenir compte, d'une manière simple, du fait qu'un pays qui a des ressources hydrauliques, qu'il utilise à la production d'électricité, économise des combustibles fossiles dans la proportion calculée. Cela revient donc à faire du pouvoir calorifique des combustibles l'étalon de mesure des énergies primaires.

C'est la voie que suit, par exemple, la Banque Mondiale (voir annexe C), qui utilise cependant un rendement un peu inférieur, de 34% (1 EJ d'électricité primaire est donc compté pour 3 EJ de pétrole).

Ce rendement de 0,34 tient compte de ce que, dans les centrales nucléaires, le rendement de la transformation en électricité de la chaleur dégagée se fait avec un rendement plus faible (0,30 à 0,35) que dans une centrale à combustible fossile.

On doit cependant relever que ce procédé de «valorisation» est fondamentalement faux puisqu'il existe bel et bien une énergie hydraulique primaire, celle (potentielle de gravitation) de l'eau captée. La transformation de celle-ci en électricité se fait avec un rendement moyen de l'ordre de 80%. La valorisation par 2,5 (respectivement 3 pour le nucléaire) majore donc cette énergie primaire hydraulique par  $0,80/0,40 = 2$  (respectivement  $0,80/0,34 = 2,4$ ).

Le procédé de «valorisation» masque aussi le fait que, dans le domaine nucléaire, il n'existe pas de définition satisfaisante d'une énergie primaire du «combustible» consommé, la chaleur dégagée à partir de 1 kg d'uranium naturel dépendant de tout le processus d'utilisation: degré d'enrichissement (avec perte d'U235), prise en compte ou non de la matière fissile restante après utilisation (U235 et Pu239), recours ou non à un cycle comprenant de la surgénération, etc. La valeur en énergie primaire du kg d'uranium considéré peut varier d'un facteur 50 à 100! On se borne donc à ne

considérer que la chaleur dégagée dans un réacteur thermique conventionnel.

On notera aussi une situation inverse en ce qui concerne l'**énergie solaire** (encore sans influence notable actuellement étant donné la faible utilisation de cette énergie). L'énergie primaire est alors le rayonnement capté, mais l'énergie produite par l'installation est soit de la chaleur (et l'on devrait tenir compte du fait que sa température est généralement assez basse: chaleur de faible qualité), soit de l'électricité (et cette dernière est obtenue avec un faible rendement: 15 à 20%; si l'on voulait valoriser l'électricité produite, le facteur de valorisation devrait être porté à 5 ou 7. Il en résulte que plus on fait appel à l'énergie solaire, plus l'énergie primaire augmente, ce qui apparaît comme indésirable alors que pour d'autres raisons il y aurait tout avantage à accroître l'appel à l'énergie solaire (c'est un exemple du fait qu'économiser l'énergie n'est pas à priori un but en soi).

Note: On remarquera, dans le même ordre d'idées, que le rendement plus élevé de la production d'électricité à partir d'énergie primaire hydraulique (80%) qu'à partir de combustibles fossiles (40%) ou d'uranium (30 à 35%) ne reflète pas une supériorité de l'hydraulique, mais provient d'un mode de calcul fondamentalement différent du rendement. Si on appliquait à la détermination du rendement hydroélectrique les mêmes principes que pour la production d'électricité à partir de la chaleur (combustibles fossiles ou nucléaires), on obtiendrait un rendement hydroélectrique inférieur à 1%!

Il existe bien une méthode générale de calcul qui fait usage d'un étalon qui échappe à ces diverses critiques: c'est le calcul en **exergie**, dans lequel toutes les énergies sont mesurées par le travail mécanique qu'on en peut tirer (appelée parfois «énergie utilisable»). Dans ce mode de calcul, il est notamment tenu compte de la température à laquelle une chaleur est disponible. Mais, bien que ce concept date d'il y a une trentaine d'années (et qu'il est bien connu des physiciens), ses avantages ne sont généralement pas encore reconnus et il n'est pas entré dans les usages.

Ce concept de l'**exergie** fait l'objet de l'Annexe G; il ne concerne pas que l'énergie primaire mais l'énergie à tous ses stades de transformation et conduit à une vision très notamment différente de l'économie de l'énergie, en particulier quant à la localisation des pertes et à leur importance, ce qui, on l'a vu, peut être déterminant dans la détermination d'une politique énergétique (voir Annexe J).

Pour terminer cet examen de l'énergie primaire, mentionnons que, dans le cas de la Suisse et pour 1988, la consommation d'**énergie primaire par habitant** est de

150 GJ selon l'Office fédéral de l'énergie (OFEN)

114 GJ selon l'ONU

185 GJ selon la Banque Mondiale

127 GJ en exergie.

Les écarts notables séparant ces chiffres, basés pourtant tous sur les mêmes indications de l'OFEN, soulignent bien les divergences existent dans la définition de ce qu'est l'énergie primaire.

*Il importe donc, et pour le moins, de n'utiliser dans les comparaisons que des chiffres ayant une même ori-*

**gine; c'est ce que nous avons fait en n'employant dans la 1<sup>re</sup> partie de l'étude que ceux issus de l'ONU.**

Mentionnons encore **deux autres sources de distorsion des chiffres relatifs à l'énergie primaire:**

a) Lorsqu'un pays, telle la Suisse, **importe des combustibles**, par exemple du pétrole ou des produits pétroliers, sa consommation inclut naturellement la valeur de ces combustibles en tant qu'énergie primaire; cette valeur est soustraite de la consommation du pays exportateur. Mais il n'en est pas de même de l'énergie qui a été dépensée dans le pays exportateur pour extraire ces combustibles, éventuellement les raffiner.

Ainsi, à consommation égale en pétrole, l'énergie primaire comptabilisée en Suisse est plus faible si le pétrole est importé que s'il était extrait de gisements situés sur le territoire national; et inversement dans le pays exportateur. En d'autres termes, le combustible importé apporte non seulement sa valeur énergétique intrinsèque mais encore l'énergie dépensée ailleurs pour son extraction et son raffinage éventuel, à laquelle il faudrait ajouter l'énergie dépensée au transport de ce combustible jusqu'à dans le pays importateur.

b) Une distorsion analogue se produit lors de l'importation de tout **produit manufacturé** ailleurs. Par exemple, la Suisse ne fabrique ni voitures automobiles, ni avions de transport. L'énergie primaire consommée en vue de leur fabrication dans les pays où ces produits sont manufacturés reste à charge de ces pays. Ces produits importés le sont donc en fait avec une énergie primaire incluse, non apparente (parfois appelée «énergie grise»).

Moins grande est l'autarcie d'un pays et plus élevées sont ces distorsions. Elles sont donc généralement d'autant plus élevées que le pays est plus petit et son niveau de vie plus élevé.

### § 3. Energie distribuée

A ce niveau également on peut relever certaines incohérences dans le mode de calcul. En voici un exemple: lorsqu'il s'agit d'électricité, l'énergie dépensée à son transport se traduit automatiquement par une diminution de l'énergie distribuée (pertes dues à la résistance, le cas échéant à l'impédance, des lignes, entraînant en particulier un dégagement de chaleur par effet Joule). L'ordre de grandeur global de ce coût énergétique est de 10%.

Mais s'il s'agit de produits pétroliers, le coût énergétique du transport dans le pays n'est pas porté en diminution de l'énergie distribuée correspondante; ce coût apparaît sous forme de consommation d'énergie utile, énergie mécanique imputée au secteur des transports. Cette énergie utile est donc surestimée d'autant, et l'énergie distribuée des combustibles est surestimée des mêmes quantités.

Ajoutons qu'en ce qui concerne la chaleur distribuée (p. ex. chauffage à distance), il n'est pas tenu compte du niveau de température auquel cette chaleur est distribuée. Cette température étant généralement modérée (env. 100 °C), sa «qualité» est relativement

faible et sa valeur en énergie fortement diminuée (n'atteignant par exemple que 10% des 60 à 70% d'exergie disponible dans le combustible, soit une réduction de 85%). Les pertes exergétiques du système sont donc très notablement plus élevées que les statistiques ne le laissent voir.

### § 4. Energie utile

Rappelons tout d'abord que le consommateur achète de l'énergie distribuée afin de disposer des moyens énergétiques dont il estime avoir besoin et qui constituent l'énergie utile. C'est la satisfaction de ce besoin qui entraîne la consommation d'énergie primaire, transformée ensuite en énergie distribuée, puis utile.

Le besoin en énergie utile étant ici admis, reconnu, l'écart entre cette dernière et l'énergie distribuée constitue une part notable des pertes du système énergétique. Elles sont importantes, évaluées pour la Suisse par l'OFEN et pour 1989 à  $778 - 437 = 341$  PJ, soit 44% de l'énergie distribuée. Quels que soient les objectifs assignés à une politique énergétique, la diminution de ces pertes, et par conséquent la diminution de l'énergie à distribuer, ne pourra qu'améliorer la situation. Il est donc important, ainsi que cela a déjà été dit, que ces pertes soient correctement évaluées et localisées. Or, elles vont dépendre directement de la définition que l'on fera de l'énergie utile.

Celle-ci est, en Suisse, constituée pour les 3/4 de chaleur et 1/4 de travail mécanique (le solde, lumière et processus chimique, ne dépassant pas 1 à 2%).

S'il n'y a pas de difficulté à déterminer un travail mécanique, il n'en est pas de même en ce qui concerne la chaleur, notamment celle utilisée au chauffage de locaux.

Idéalement, cette chaleur est celle nécessaire au maintien de la température (p. ex. 20 °C) des locaux, c'est-à-dire en fait des parois, du mobilier et de l'air. Avec une isolation thermique parfaite des locaux, cette chaleur serait nulle; même l'air frais de ventilation pourrait être réchauffé par l'air vicié expulsé. Mais il est évident que si les locaux sont mal isolés, une énergie appréciable sera nécessaire à leur chauffage.

Dans la statistique, l'**énergie utile de chauffage** est celle effectivement consommée, quelle que soit la qualité de l'isolation. Les pertes en énergie distribuée se limitent ainsi à l'écart existant entre la valeur énergétique du combustible (éventuellement de l'électricité) acheté par le consommateur et la chaleur libérée dans les locaux. Ces pertes proviennent par exemple de la chaleur entraînée dans la cheminée par les gaz de combustion (ordre de grandeur: 10%). Mais il semble clair qu'on devrait y ajouter tout ou partie des pertes provoquées, le cas échéant, par une isolation insuffisante; cependant l'appréciation de ce qu'est une isolation suffisante (nécessairement imparfaite) est subjective. Il ne paraît donc pas exister de définition objective, indiscutable, de la chaleur utile de chauffage.

A cette observation s'ajoute le fait qu'ici aussi la statistique ne tient pas compte du niveau de température, ce qui exigerait de passer par le concept d'exergie.

**A 4**

Ainsi, dans l'installation de chauffage central d'un immeuble bien construit, la chaleur utile peut-elle être réduite à un minimum jugé acceptable, mais on ne tiendra aucunement compte de la perte importante résultant de ce que la chaleur est dégagée à 1000 °C dans le foyer de la chaudière, puis est transférée à un circuit d'eau chaude à 70 °C. Or, il est possible d'utiliser ce grand saut de température et d'en tirer une énergie utile, par exemple mécanique (voir Annexe J).

On retiendra donc que la définition de ce qui est énergie utile est très incertaine dès lors qu'il s'agit de chauffage de locaux.

Ainsi en Suisse, les deux grandes sources de pertes entre énergie distribuée et énergie utile sont-elles:

- le mauvais rendement (environ 20% en pratique) des moteurs à explosions,
- l'isolation non suffisante des locaux, mais surtout la non-utilisation de l'écart de température entre le foyer des chaudières et le circuit d'eau de chauffage (perte d'exergie que des systèmes «chaleur-force» avec réseaux de chauffage à distance permettraient de réduire, ainsi qu'un plus large recours aux pompes à chaleur).

## ANNEXE B

# POPULATION, PIB ET ÉNERGIE PRIMAIRE CONSOMMÉE DANS LES PRINCIPAUX PAYS

**Liste des principaux pays** (de plus de 5 millions d'habitants) avec indication, en 1985, de l'effectif de la population, du PIB (en US\$ 1985), national et par

habitant, et de la consommation d'énergie primaire, totale et par habitant, selon statistiques des Nations Unies.

**Tableau B1: GROUPE A: 27 pays industrialisés**

H > 50 GJ/hab.an en 1980

H: énergie primaire d'un pays par habitant

|                         | 1985                  | Population | Produit intérieur brut par an |                          | Energie primaire annuelle |              |
|-------------------------|-----------------------|------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------|
|                         |                       |            | P<br>M.hab.                   | R<br>G.\$1985<br>\$/hab. | E<br>EJ                   | H<br>GJ/hab. |
| A                       | Autriche .....        | 7,555      | 66,05                         | 8 743                    | 0,90                      | 119          |
| AE                      | Allemagne Est .....   | 16,644     | 122,10                        | 7 336                    | 3,83                      | 230          |
| AO                      | Allemagne Ouest ..... | 61,015     | 624,97                        | 10 243                   | 10,27                     | 168          |
| AR                      | Argentine .....       | 30,564     | 65,92                         | 2 157                    | 1,47                      | 48           |
| AS                      | Afrique du Sud .....  | 37,205     | 56,50                         | 1 518                    | 3,03                      | 81           |
| AU                      | Australie .....       | 15,758     | 162,49                        | 10 312                   | 3,09                      | 196          |
| B                       | Belgique .....        | 9,903      | 79,08                         | 7 985                    | 1,65                      | 167          |
| BG                      | Bulgarie .....        | 8,960      | 25,45                         | 2 840                    | 1,51                      | 169          |
| CA                      | Canada .....          | 25,359     | 348,29                        | 13 734                   | 7,38                      | 291          |
| DK                      | Danemark .....        | 5,114      | 58,06                         | 11 354                   | 0,80                      | 156          |
| E                       | Espagne .....         | 38,505     | 164,25                        | 4 266                    | 2,51                      | 65           |
| F                       | France .....          | 55,170     | 510,33                        | 9 250                    | 6,50                      | 118          |
| GB                      | Royaume-Uni .....     | 56,618     | 454,54                        | 8 028                    | 8,08                      | 143          |
| GR                      | Grèce .....           | 9,934      | 33,76                         | 3 398                    | 0,67                      | 68           |
| H                       | Hongrie .....         | 10,649     | 20,56                         | 1 931                    | 1,19                      | 112          |
| I                       | Italie .....          | 57,128     | 358,67                        | 6 278                    | 5,75                      | 101          |
| J                       | Japon .....           | 120,754    | 1325,20                       | 10 974                   | 13,49                     | 112          |
| PB                      | Pays-Bas .....        | 14,484     | 124,98                        | 8 629                    | 2,88                      | 199          |
| PL                      | Pologne .....         | 37,203     | 70,44                         | 1 893                    | 5,05                      | 136          |
| R                       | Roumanie .....        | 22,725     | 55,54                         | 2 444                    | 3,04                      | 134          |
| S                       | Suède .....           | 8,350      | 100,25                        | 12 006                   | 1,23                      | 147          |
| SU                      | Suisse .....          | 6,497      | 92,78                         | 14 280                   | 0,72                      | 110          |
| TC                      | Tchécoslovaquie ..... | 15,458     | 48,47                         | 3 136                    | 2,85                      | 185          |
| UR                      | URSS .....            | 277,537    | 749,35                        | 2 700                    | 50,29                     | 181          |
| USA                     | Etats-Unis .....      | 239,283    | 3959,61                       | 16 548                   | 66,90                     | 280          |
| V                       | Venezuela .....       | 17,317     | 49,61                         | 2 864                    | 1,65                      | 95           |
| YU                      | Yougoslavie .....     | 23,236     | 44,24                         | 1 904                    | 1,57                      | 68           |
| GROUPE A: 27 pays ..... |                       | 1228,925   | 9771,49                       | 7 951                    | 208,30                    | 169,50       |

**B 2**

Les pays sont séparés en trois groupes:

Groupe A: 27 pays industrialisés: consommation d'énergie primaire par habitant supérieure à 50 GJ en 1980.

Groupe B: 29 pays en voie d'industrialisation: consommation comprise entre 8 et 50 GJ/hab.an en 1980.

Groupe C: 33 pays moins développés: consommation inférieure à 8 GJ/hab.an en 1980.

Ces listes totalisent 89 pays, reportés sur la figure 1.

Pour établir les valeurs données au tableau 3 du total mondial, nous avons ajouté à celles de cette Annexe B les valeurs correspondant à 90 autres pays plus petits; on obtient ainsi des chiffres représentatifs de plus de 99% de la population mondiale (et de sa consommation).

**Tableau B2: GROUPE B: 29 pays en voie d'industrialisation**

8 < H < 50 GJ/hab.an en 1980

|                   | Nom                          | 1985     | Population<br>M.hab. | Produit intérieur<br>brut par an |              | Energie primaire<br>annuelle |              |
|-------------------|------------------------------|----------|----------------------|----------------------------------|--------------|------------------------------|--------------|
|                   |                              |          |                      | G.\$1985                         | R<br>\$/hab. | E<br>EJ                      | H<br>GJ/hab. |
| AB                | Arabie Saoudite .....        | 11,542   | 79,15                | 6 858                            | 1,40         | 121                          |              |
| AG                | Algérie .....                | 21,718   | 55,68                | 2 564                            | 0,59         | 27                           |              |
| BO                | Bolivie .....                | 6,429    | 6,27                 | 975                              | 0,06         | 9                            |              |
| BR                | Brésil .....                 | 135,564  | 226,79               | 1 673                            | 2,82         | 21                           |              |
| C                 | Cuba .....                   | 10,098   | 15,15                | 1 500                            | 0,41         | 40                           |              |
| CH                | Chili .....                  | 12,122   | 16,00                | 1 320                            | 0,32         | 26                           |              |
| CO                | Colombie .....               | 28,624   | 34,19                | 1 194                            | 0,69         | 24                           |              |
| CP                | Chine populaire .....        | 1059,521 | 236,06               | 223                              | 20,76        | 20                           |              |
| CR                | Corée du Nord .....          | 20,385   | 15,64                | 767                              | 1,66         | 82                           |              |
| CS                | Corée du Sud .....           | 41,056   | 86,18                | 2 099                            | 1,92         | 47                           |              |
| EG                | Egypte .....                 | 48,503   | 64,05                | 1 321                            | 0,94         | 19                           |              |
| EQ                | Equateur .....               | 9,378    | 15,98                | 1 704                            | 0,18         | 19                           |              |
| GT                | Guatemala .....              | 7,963    | 11,13                | 1 398                            | 0,05         | 6                            |              |
| HK                | Hongkong .....               | 5,456    | 34,19                | 6 266                            | 0,27         | 50                           |              |
| IK                | Irak .....                   | 15,898   | 46,77                | 2 942                            | 0,30         | 19                           |              |
| IR                | Iran .....                   | 44,212   | 168,10               | 3 802                            | 1,64         | 37                           |              |
| MA                | Maroc .....                  | 21,941   | 11,89                | 542                              | 0,21         | 10                           |              |
| ML                | Malaisie .....               | 15,681   | 31,23                | 1 992                            | 0,48         | 31                           |              |
| MX                | Mexique .....                | 78,524   | 177,47               | 2 260                            | 3,89         | 50                           |              |
| P                 | Portugal .....               | 10,157   | 20,69                | 2 037                            | 0,41         | 41                           |              |
| PE                | Pérou .....                  | 19,698   | 14,39                | 731                              | 0,30         | 15                           |              |
| PH                | Philippines .....            | 54,378   | 32,79                | 603                              | 0,40         | 7                            |              |
| RD                | République dominicaine ..... | 6,243    | 4,65                 | 745                              | 0,08         | 12                           |              |
| SY                | Syrie .....                  | 10,268   | 20,27                | 1 974                            | 0,33         | 32                           |              |
| T                 | Turquie .....                | 49,272   | 52,70                | 1 070                            | 1,32         | 27                           |              |
| TH                | Thaïlande .....              | 51,301   | 38,34                | 747                              | 0,64         | 13                           |              |
| TN                | Tunisie .....                | 7,081    | 8,21                 | 1 160                            | 0,15         | 22                           |              |
| Z                 | Zimbabwe .....               | 8,379    | 5,02                 | 600                              | 0,14         | 16                           |              |
| ZB                | Zambie .....                 | 6,666    | 2,60                 | 390                              | 0,06         | 8                            |              |
| GROUPE B: 29 pays |                              | 1818,058 | 1531.58              | 842                              | 42,42        | 23                           |              |

**Tableau B3: GROUPE C: 33 pays moins développés**

H &lt; 8 GJ/hab.an en 1980

| 1985                    |                     | Population  | Produit intérieur brut par an |              | Energie primaire annuelle |              |
|-------------------------|---------------------|-------------|-------------------------------|--------------|---------------------------|--------------|
| Nom                     |                     | P<br>M.hab. | G.\$1985                      | R<br>\$/hab. | E<br>EJ                   | H<br>GJ/hab. |
| AF                      | Afghanistan .....   | 18,136      | 3,860                         | 213          | 0,050                     | 2,8          |
| AN                      | Angola .....        | 8,754       | 1,665                         | 190          | 0,031                     | 3,5          |
| BD                      | Bangladesh .....    | 98,657      | 17,204                        | 174          | 0,168                     | 1,7          |
| BF                      | Burkina Faso .....  | 6,639       | 0,932                         | 140          | 0,006                     | 0,9          |
| BI                      | Birmanie .....      | 37,152      | 6,812                         | 183          | 0,085                     | 2,3          |
| CI                      | Côte d'Ivoire ..... | 9,810       | 6,830                         | 696          | 0,060                     | 6,1          |
| CM                      | Cameroun .....      | 10,186      | 10,168                        | 998          | 0,086                     | 8,4          |
| ET                      | Ethiopie .....      | 43,350      | 5,334                         | 123          | 0,024                     | 0,6          |
| GH                      | Ghana .....         | 13,588      | 6,900                         | 508          | 0,042                     | 3,1          |
| GN                      | Guinée .....        | 6,075       | 2,376                         | 391          | 0,014                     | 2,3          |
| HT                      | Haïti .....         | 5,273       | 2,009                         | 381          | 0,010                     | 1,9          |
| ID                      | Indonésie .....     | 163,393     | 85,081                        | 521          | 1,314                     | 8,0          |
| IN                      | Inde .....          | 750,859     | 196,904                       | 262          | 5,627                     | 7,5          |
| K                       | Kenya .....         | 20,333      | 5,769                         | 284          | 0,050                     | 2,5          |
| KA                      | Kampuchéa .....     | 7,284       | 0,585                         | 80           | 0,006                     | 0,8          |
| M                       | Madagascar .....    | 9,985       | 2,345                         | 235          | 0,014                     | 1,4          |
| MI                      | Mali .....          | 8,206       | 0,577                         | 70           | 0,006                     | 0,7          |
| MO                      | Mozambique .....    | 13,961      | 6,003                         | 430          | 0,017                     | 1,2          |
| MW                      | Malawi .....        | 7,059       | 1,025                         | 145          | 0,009                     | 1,3          |
| NG                      | Nigeria .....       | 95,198      | 59,494                        | 625          | 0,550                     | 5,8          |
| NI                      | Niger .....         | 6,115       | 1,790                         | 293          | 0,010                     | 1,6          |
| NP                      | Népal .....         | 16,625      | 2,288                         | 138          | 0,012                     | 0,7          |
| OU                      | Ouganda .....       | 15,477      | 0,486                         | 31           | 0,011                     | 0,7          |
| PK                      | Pakistan .....      | 96,180      | 33,136                        | 345          | 0,710                     | 7,4          |
| RW                      | Rwanda .....        | 6,070       | 1,711                         | 282          | 0,006                     | 1,0          |
| SD                      | Soudan .....        | 21,550      | 5,677                         | 263          | 0,043                     | 2,0          |
| SE                      | Sénégal .....       | 6,444       | 2,642                         | 410          | 0,026                     | 4,0          |
| SL                      | Sri Lanka .....     | 15,837      | 5,808                         | 367          | 0,054                     | 3,4          |
| TA                      | Tchad .....         | 5,018       | 0,641                         | 128          | 0,003                     | 0,6          |
| TZ                      | Tanzanie .....      | 21,733      | 6,401                         | 295          | 0,027                     | 1,2          |
| VI                      | Vietnam .....       | 59,713      | 6,500                         | 109          | 0,206                     | 3,5          |
| YE                      | Yémen du Nord ..... | 6,849       | 2,805                         | 410          | 0,034                     | 5,0          |
| ZA                      | Zaïre .....         | 30,363      | 2,911                         | 96           | 0,057                     | 1,9          |
| GROUPE C: 33 pays ..... |                     | 1641,872    | 494,669                       | 301          | 9,368                     | 5,7          |

## ANNEXE C

# CORRÉLATION «NIVEAU DE VIE – CONSOMMATION D'ÉNERGIE» À PARTIR DES DONNÉES DE LA BANQUE MONDIALE

Dans l'étude, nous avons choisi, pour mesurer le niveau de vie, le produit intérieur brut (PIB) par habitant. D'autres indicateurs économiques auraient pu être envisagés. Cherchant à définir un «indice du développement humain», la Banque Mondiale a récemment été conduite à combiner l'espérance de vie à la naissance, le degré d'alphabétisation et la «parité de pouvoir d'achat» (PPP: purchasing-power parity). Ce dernier indicateur semble donner une meilleure appréciation du niveau de vie réel (éliminant du PIB des éléments qui ne contribuent pas réellement au niveau de vie). Calculé en valeurs réelles, en dollars US 1987, ce PPP a été publié (mai 1990) pour 1988. A la suggestion du professeur Chs Iffland (de l'Ecole des HEC de l'Université de Lausanne), nous l'avons employé pour dresser un graphique similaire à celui de la figure 2, en utilisant, par souci de cohérence, les consommations d'énergie primaire par habitant en 1988 calculées par la même Banque Mondiale (donc différentes de celles déterminées par l'ONU, comme indiqué à l'Annexe A, § 2).

Le tableau C1 donne les valeurs ainsi établies, qui conduisent à la figure C2.

Note: Des 89 pays de la figure 2 de l'étude, seuls 77 sont indiqués dans la figure C1, certains pays, notamment l'URSS, n'étant pas «déclarants» auprès de la Banque Mondiale.

Comme pour la figure 2, les groupes A, B et C ont été maintenus et les agrégats correspondants donnent, sur le graphique, les points marqués par une «étoile». Cette figure appelle les commentaires suivants:

- a) On vérifie à nouveau l'existence d'un alignement moyen des points; il y a bien une corrélation marquée entre le PPP par habitant et la consommation d'énergie primaire par habitant (cette dernière calculée, rappelons-le, selon la méthode de la Banque Mondiale).
- b) La consommation d'énergie des pays les plus pauvres paraît anormalement faible (comme sur la figure 2), ce qui peut s'expliquer de la même manière: une part notable de l'énergie consommée ne passa pas par les circuits commerciaux, seuls pris en compte ici.
- c) Les trois «étoiles» des groupes A, B et C sont presqu'exactement alignées.

d) Mais la pente de la droite moyenne est plus marquée que dans la présentation de la figure 2, basée sur les chiffres de l'ONU, cette pente atteint 1,3. Il n'y a plus simple proportionnalité entre l'indicateur économique et la consommation d'énergie primaire: cette dernière croît plus vite (pour 10% d'augmentation du PPP, il y a 13% d'énergie primaire supplémentaire consommée).

*Si l'on admet que le mode de calcul de la Banque Mondiale est plus satisfaisant, tant en ce qui concerne la définition de l'énergie primaire que pour ce qui est de l'indicateur économique utilisé (PPP: purchasing-power parity), le commentaire d) ci-dessus prend de l'importance. Plus le consommateur dispose de pouvoir réel d'achat, plus il fait appel à des biens et services exigeant de l'énergie primaire, et cela au-delà de la simple proportionnalité.*

Cette observation est donc nettement en contradiction avec l'affirmation, marquée sans doute d'idéal (peut-être d'idéologie), selon laquelle on peut concevoir une amélioration du niveau de vie, sans accroissement de la consommation d'énergie (ce qui, sur le graphique, correspondrait à une horizontale).

Que la pente soit supérieure à 1,0 (donc que l'énergie consommée croisse avec la puissance 1,3 du pouvoir d'achat) pourrait s'expliquer par le fait que plus le consommateur est «riche» plus il fait appel à des biens et services de plus haute technicité, dont tant la production que l'utilisation exigent plus d'énergie.

Cela justifie «a posteriori» le fait que dans la 1<sup>re</sup> partie de l'étude nous n'avons pas cherché à lier de manière précise la croissance de la consommation d'énergie à celle du PIB, aussi bien du fait que le PIB n'est qu'un indicateur parmi d'autres que du fait du caractère discutable de la définition utilisée de l'énergie primaire.

|                             | NOM                | GJ<br>hab. | P.Ach. | NOM                 | GJ<br>hab. | P.Ach. |
|-----------------------------|--------------------|------------|--------|---------------------|------------|--------|
| Groupe A (p. indust.)       | A Autriche         | 149        | 12 386 | H Hongrie           | 135        | 4 500  |
|                             | AO Allemagne Ouest | 195        | 14 730 | I Italie            | 115        | 10 682 |
|                             | AR Argentine       | 67         | 4 647  | J Japon             | 145        | 13 135 |
|                             | AS Afrique du Sud  | 107        | 4 981  | PB Pays-Bas         | 230        | 12 661 |
|                             | AU Australie       | 227        | 11 782 | PL Pologne          | 152        | 4 000  |
|                             | B Belgique         | 210        | 13 140 | R Roumanie          | 152        | 3 000  |
|                             | CA Canada          | 426        | 16 375 | S Suède             | 291        | 13 780 |
|                             | DK Danemark        | 192        | 15 119 | SU Suisse           | 184        | 15 403 |
|                             | E Espagne          | 83         | 8 989  | USA Etats-Unis      | 337        | 17 615 |
|                             | F France           | 163        | 13 961 | V Vénézuéla         | 104        | 4 306  |
|                             | GB Royaume-Uni     | 165        | 12 270 | YU Yougoslavie      | 95         | 5 000  |
|                             | GR Grèce           | 87         | 5 500  |                     |            |        |
|                             |                    |            |        |                     |            |        |
| Groupe B (p. en voie d'in.) | AB Arabie Saoudite | 136        | 8 320  | MA Maroc            | 11         | 1 761  |
|                             | AG Algérie         | 48         | 2 633  | ML Malaisie         | 35         | 3 849  |
|                             | BO Bolivie         | 11         | 1 380  | MX Mexique          | 57         | 4 624  |
|                             | BR Brésil          | 36         | 4 307  | P Portugal          | 58         | 5 597  |
|                             | CH Chili           | 39         | 4 862  | PE Pérou            | 21         | 3 129  |
|                             | CO Colombie        | 33         | 3 524  | PH Philippines      | 11         | 1 878  |
|                             | CP Chine populaire | 26         | 2 124  | RD Rép. Dominicaine | 15         | 1 750  |
|                             | CS Corée du Sud    | 67         | 4 832  | SY Syrie            | 40         | 3 250  |
|                             | EG Egypte          | 27         | 1 357  | T Turquie           | 36         | 3 781  |
|                             | EQ Equateur        | 25         | 2 687  | TH Thaïlande        | 15         | 2 576  |
|                             | GT Guatémala       | 7          | 1 957  | TN Tunisie          | 22         | 2 741  |
|                             | HK Hong-Kong       | 67         | 13 906 | Z Zimbabwe          | 23         | 1 184  |
|                             | IK Irak            | 34         | 2 400  | ZB Zambie           | 19         | 717    |
|                             | IR Iran            | 39         | 3 300  |                     |            |        |
|                             |                    |            |        |                     |            |        |
| Groupe C (p. moins dév.)    | BD Bangladesh      | 2,2        | 883    | NI Niger            | 1,9        | 452    |
|                             | CM Cameroun        | 6,7        | 1 381  | NP Népal            | 1,0        | 722    |
|                             | ET Ethiopie        | 0,9        | 454    | OU Ouganda          | 1,1        | 511    |
|                             | GH Ghana           | 5,5        | 481    | PK Pakistan         | 9,3        | 1 585  |
|                             | GN Guinée          | 3,4        | 500    | RW Rwanda           | 1,8        | 571    |
|                             | HT Haïti           | 2,5        | 775    | SD Soudan           | 3,0        | 750    |
|                             | ID Indonésie       | 10,3       | 1 660  | SE Sénégal          | 6,8        | 1 058  |
|                             | IN Inde            | 9,3        | 1 053  | SL Sri-Lanka        | 7,1        | 2 053  |
|                             | K Kénya            | 4,1        | 704    | TA Tchad            | 0,8        | 400    |
|                             | M Madagascar       | 1,7        | 634    | TZ Tanzanie         | 1,6        | 405    |
|                             | MI Mali            | 0,9        | 543    | VI Vietnam          | 4,1        | 1 000  |
|                             | MO Mozambique      | 3,8        | 500    | YE Yémen du Nord    | 4,5        | 1 250  |
|                             | MW Malawi          | 1,9        | 476    | ZA Zaïre            | 3,3        | 220    |
|                             | NI Nigéria         | 6,6        | 668    |                     |            |        |
|                             |                    |            |        |                     |            |        |

Tableau C1 Energie primaire consommée en 1988 (GJ/hab.) et parité de pouvoir d'achat (US\$ 1987/hab.) dans 77 pays, selon Banque Mondiale

Groupe A: 23 pays industrialisés 910 M. hab. 204 GJ/hab. 12 240 \$/hab.

B: 27 pays en voie d'industrialisation 1930 M. hab. 30 GJ/hab. 2670 \$/hab.

C: 27 pays moins développés 1550 M. hab. 7,4 GJ/hab. 1040 \$/hab.

(pays de plus de 5 M. hab. en 1975, «déclarant» auprès de la Banque Mondiale.)

## C 3

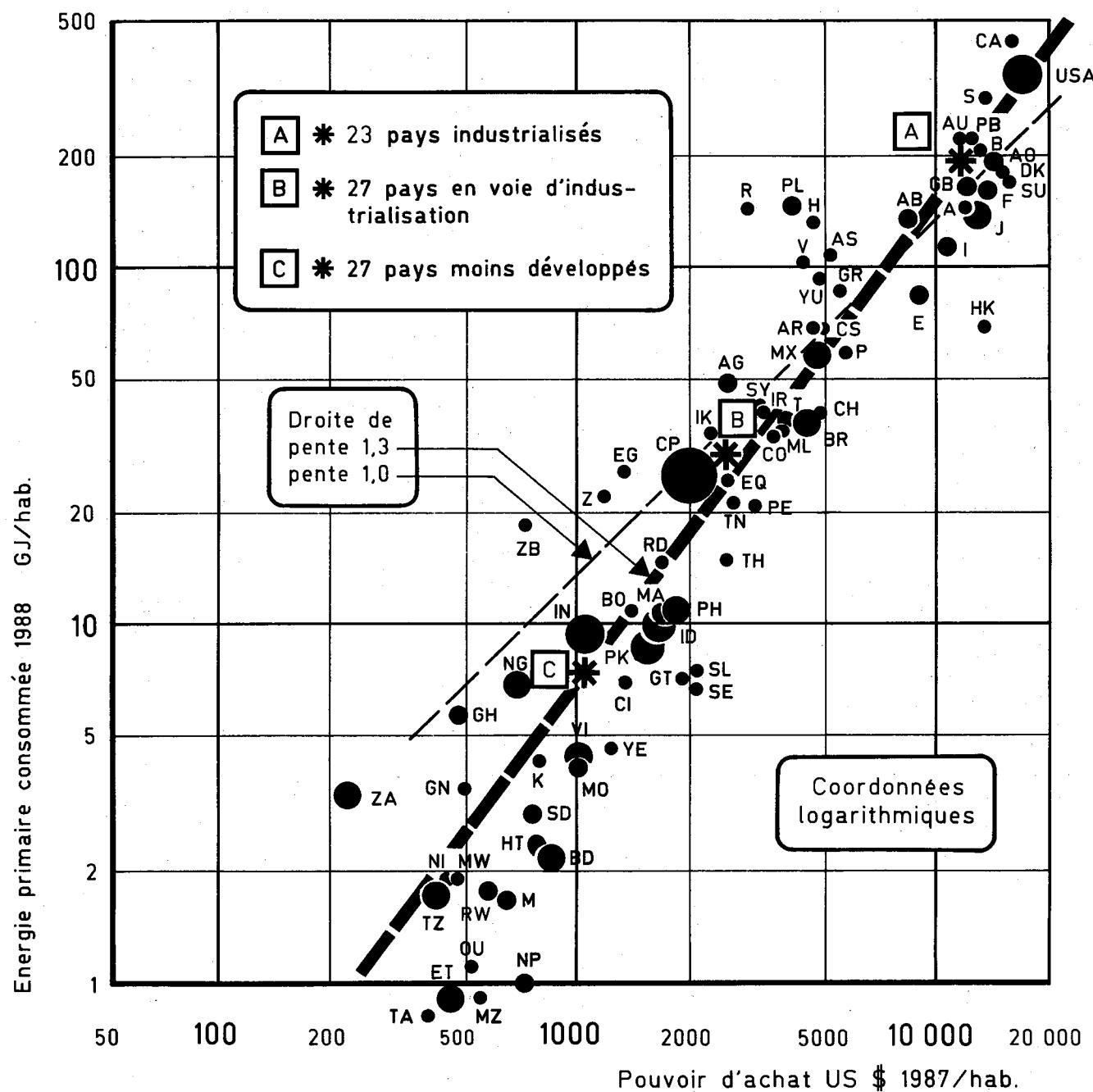


Fig. C2 Corrélation «Pouvoir d'achat – Energie primaire consommée»  
(légende des noms: voir tableau C1)

**ANNEXE D****PRÉVISIONS DE CONSOMMATION MONDIALE  
D'ÉNERGIE PRIMAIRE DE 1990 À 2040**

Groupe A: pays industrialisés

Groupe B: pays en voie d'industrialisation

Groupe C: pays moins développés

Composition des trois groupes de pays:  
voir Annexe B.

Méthode: On se donne les taux annuels moyens de croissance par tranche de 10 ans (5 ans pour 1985-1990) pour la population et pour l'énergie par habitant; on en déduit l'effectif des populations et l'énergie consommée par habitant; leur produit donne l'énergie totale consommée, dont on déduit le taux annuel moyen d'augmentation.

Pour l'extrapolation 2000-2100 (fig. 7) la même méthode est suivie, par tranche de 20 ans.

D 2

## GROUPE A . Pays industrialisés

| Années | Population |      | Energie/hab. |      | Energie totale |      |
|--------|------------|------|--------------|------|----------------|------|
|        |            | taux |              | taux |                | taux |
| 1975   | 1,177      | 0,76 | 158,0        | 0,71 | 186            | 1,41 |
| 1985   | 1,269      | 0,71 | 169,6        | 0,70 | 214            | 1,54 |
| 1990   | 1,315      | 0,66 | 175,6        | 0,65 | 231            | 1,31 |
| 2000   | 1,403      | 0,60 | 187,4        | 0,60 | 263            | 1,19 |
| 2010   | 1,489      | 0,55 | 199,0        | 0,55 | 296            | 1,12 |
| 2020   | 1,573      | 0,50 | 210,2        | 0,50 | 331            | 0,98 |
| 2030   | 1,653      | 0,45 | 221,0        | 0,45 | 365            | 0,89 |
| 2040   | 1,729      |      | 231,1        |      | 399            |      |

## GROUPE B . Pays en voie d'industrialisation

| Années | Population |      | Energie/hab. |      | Energie totale |      |
|--------|------------|------|--------------|------|----------------|------|
|        |            | taux |              | taux |                | taux |
| 1975   | 1.567      | 1,74 | 17,87        | 3,29 | 28             | 5,1  |
| 1985   | 1.862      | 1,65 | 24,70        | 3,0  | 46             | 4,7  |
| 1990   | 2.021      | 1,50 | 28,6         | 2,7  | 57,8           | 4,2  |
| 2000   | 2.345      | 1,35 | 37,3         | 2,4  | 87,4           | 3,8  |
| 2010   | 2.682      | 1,20 | 47,3         | 2,1  | 126,8          | 3,3  |
| 2020   | 3.022      | 1,10 | 58,2         | 1,8  | 175,9          | 2,9  |
| 2030   | 3.371      | 1,00 | 69,6         | 1,5  | 234,6          | 2,5  |
| 2040   | 3.724      |      | 80,8         |      | 300,9          |      |

## GROUPE C . Pays moins développés

| Années | Population |      | Energie/hab. |      | Energie totale |      |
|--------|------------|------|--------------|------|----------------|------|
|        |            | taux |              | taux |                | taux |
| 1975   | 1,352      | 2,35 | 5,26         | 3,78 | 7              | 6,4  |
| 1985   | 1,706      |      | 7,62         |      | 13             |      |
|        |            | 2,0  |              | 4,0  |                | 6,1  |
| 1990   | 1,884      | 1,80 | 9,27         | 3,5  | 17,47          | 5,36 |
| 2000   | 2,252      | 1,65 | 13,08        | 3,0  | 29,46          | 4,70 |
| 2010   | 2,652      | 1,50 | 17,58        | 2,5  | 46,62          | 4,04 |
| 2020   | 3,078      | 1,40 | 22,50        | 2,0  | 69,26          | 3,43 |
| 2030   | 3,537      | 1,30 | 27,43        | 1,5  | 97,02          | 2,82 |
| 2040   | 4,025      |      | 31,83        |      | 128,12         |      |

## Energie totale (A+B+C)

| 1975 | 1985 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020 | 2030 | 2040 |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 221  | 273  | 306  | 379  | 470  | 576  | 696  | 828  | EJ   |
| 2.1  | 2.3  | 2.2  | 2.2  | 2.1  | 1.9  | 1.8  |      | %/an |

Tableau D1 Prévision de consommation mondiale d'énergie primaire 1990-2040

### Populations en milliards d'habitants

### taux moyens

Energie/habitant en GJ/hab. an

taux moyens  
annuels en %/an

### Energie totale en EJ

| Années | Population<br>G.hab. taux<br>%/an | Energie/hab.<br>GJ/hab. taux<br>%/an | Energie totale<br>EJ taux<br>%/an |
|--------|-----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| 2000   | 6,0                               | 63,3                                 | 380                               |
| 2020   | 7,7                               | 74,0                                 | 570 2,00                          |
| 2040   | 9,5                               | 84,2                                 | 800 1,70                          |
|        | 0,9                               | 0,53                                 | 1,45                              |
| 2060   | 11,4                              | 93,6                                 | 1067                              |
| 2080   | 13,1                              | 103,4                                | 1354 1,22                         |
| 2100   | 14,5                              | 114,2                                | 1652 1,00                         |

Tableau D2 *Esquisse de la consommation mondiale d'énergie primaire possible jusqu'en 2100*

## ANNEXE E

# ÉNERGIE NUCLÉAIRE DE FISSION

### § 1. Conversion et surgénération

#### a) Rappel simplifié

L'uranium naturel est principalement formé de deux isotopes, l'U238 à raison de 99,3% et l'U235 à raison de 0,7%.

Note: Pour mémoire: les isotopes sont des corps ayant les mêmes propriétés chimiques, mais des noyaux différents; pour l'uranium, les noyaux sont formés de 92 protons et de 146 ou 143 neutrons; à l'état neutre, électriquement, le noyau est entouré d'un nombre d'électrons (chargés négativement) égal au nombre des protons (chargés positivement); ce sont les électrons qui déterminent les propriétés chimiques.

Le noyau d'U235 est dit «fissile» parce qu'il se brise sous le choc d'un neutron, la probabilité de fission variant avec l'énergie du neutron, plus élevée pour un neutron dit «lent» ou «thermique» (sa vitesse correspond alors à la vitesse d'agitation thermique pour les températures usuelles des installations, p. ex. 200 à 400 °C). La fission est la fracture du noyau en 2 (éventuellement 3) fragments, qui sont autant de nouveaux noyaux (les «produits de fission» PF), généralement instables par excès de neutrons; ils retrouveront leur stabilité à la suite d'une ou plusieurs modifications, dites désintégrations, avec émission de particules ou de radiations: ils sont donc temporairement radioactifs. Mais la fission de l'U235 s'accompagne de l'émission de 2 à 3 neutrons, de haute énergie (grandes vitesses), susceptibles de provoquer la fission d'autres noyaux d'U235. Il peut donc, dans certaines conditions, y avoir «réaction en chaîne». La fission s'accompagne également de l'émission de radiations (ondes électromagnétiques de haute énergie). Ainsi la fission libère-t-elle une énergie considérable, partagée entre 85% sous forme d'énergie cinétique des PF, 2 à 3% en énergie cinétique des neutrons émis, 2 à 3% sous forme de rayons et 10% en énergie d'activation des PF (cette dernière sera libérée ultérieurement au fur et à mesure du retour des PF à l'état stable). Ces diverses énergies seront absorbées par les masses voisines où elles apparaîtront sous forme de chaleur (qu'il faudra évacuer si l'on ne veut pas que la température s'élève).

Pour que la réaction en chaîne s'établisse, il faut une combinaison appropriée d'une densité suffisante de noyaux d'U235 et d'un flux de neutrons ayant une énergie favorable.

Si l'on veut utiliser de l'uranium naturel, les neutrons émis lors des fissions devront être fortement ralentis, sans cependant être absorbés (c'est le rôle du modérateur) ou perdus à la périphérie (ce qui exige une masse importante). La présence d'une forte propor-

tion d'U238 (non fissile) rend ces conditions plus difficiles à satisfaire, une partie des neutrons étant capturés par cet U238. Celui-ci se transforme alors en plutonium 239, qui, lui, est fissile, raison pour laquelle on dit que l'U238 est «fertile» (notons qu'il existe dans la nature, largement répandu, un autre corps fertile, le thorium 232, qui, dans un flux de neutrons, se transforme en U233, fissile).

#### b) Enrichissement

Il est clair que si l'on augmente la proportion d'U235 dans l'uranium, la probabilité de fission augmentant, on pourra d'autre part accepter de perdre ailleurs une certaine proportion des neutrons, par exemple par:

- emploi d'un modérateur absorbant davantage de neutrons, mais moins coûteux (p. ex. eau ordinaire en place d'eau lourde),
- masse totale plus faible (donc plus de neutrons perdus à la périphérie),
- structures plus absorbantes, etc.

L'opération, dite «enrichissement» de l'uranium, n'est pas aisée (elle est donc onéreuse) puisqu'il s'agit de séparer deux isotopes, c'est-à-dire deux corps ayant des propriétés chimiques identiques. C'est la différence de masse atomique (235 – 238) qui doit être mise à profit. La méthode généralement utilisée est celle de la diffusion gazeuse: on fait passer un composé chimique ( $\text{UF}_6$ , hexafluorure d'U) à l'état gazeux à travers des parois semi-perméables; les molécules plus légères formées avec U235 diffusent un peu plus vite que celles formées avec U238; à chaque passage, la proportion en U235 augmente très légèrement.

Malgré le coût de l'enrichissement, l'opération est avantageuse dans certaines limites. Les grands réacteurs actuels utilisent généralement de l'uranium enrichi à 2,5 à 3% d'U235 (au lieu de 0,7% de l'U naturel).

#### c) Conversion

Ainsi qu'on l'a vu, une part des neutrons émis lors des fissions est capturée par l'U238 (99,3% de l'uranium s'il est naturel, 97% s'il est enrichi à 3% d'U235). Il se forme donc du plutonium, et cela dans tous les réacteurs.

Or, ce plutonium 239 étant fissile, il va participer ensuite à la réaction en chaîne, au même titre que l'U235. Il y a donc simultanément:

- formation de matière fissile nouvelle (Pu239 à partir de U238)
- consommation de matière fissile (fission d'U235 et de Pu239).

Le rapport

$$C = \frac{\text{matière fissile nouvellement formée}}{\text{matière fissile consommée}}$$

est dit « coefficient de conversion ».

De l'ordre de 0,4 dans un réacteur à uranium naturel, il est d'environ 0,6 dans les réacteurs actuels (à uranium enrichi à 2 à 3% et modérés à l'eau ordinaire).

Si  $N_e$  est le nombre des neutrons émis lors d'une fission, qu'il doit en rester 1 à disposition pour une nouvelle fission (réaction entretenue), que  $p$  est le nombre des neutrons perdus (capturés, etc.), on peut écrire

$$C = N_e - 1 - p$$

Le nombre  $N_e$  dépend du noyau subissant la fission (U235 ou Pu239) et de l'énergie du neutron incident, produisant la fission.

#### d) *Surgénération*

On peut concevoir des dispositions et des combinaisons qui permettent d'atteindre pour  $C$  des valeurs voisines de l'unité, et même supérieures (jusqu'à un maximum de 1,3 à 1,4).

On génère alors plus de matière fissile (à partir de l'U238, éventuellement du Th232) que l'on n'en consomme (U235 + Pu239, éventuellement U233).

De la relation précédente, il ressort immédiatement que pour obtenir  $C > 1$  il faut que  $N_e - p > 2$ .

Mais si la fission est le fait de neutrons thermiques (ralentis), pour lesquels la probabilité de fission est élevée (p. ex. 1000 fois plus que pour les neutrons très rapides issus de la fission), le nombre «  $N_e$  » ne peut guère dépasser 2,2 à 2,3. Cela ne laisse qu'une marge de 0,2 à 0,3 pour le nombre  $p$  des neutrons perdus. Cette marge est trop faible en pratique compte tenu des nombreuses pertes possibles.

Cependant, les conditions sont très améliorées quant à «  $N_e$  » si l'on cherche à obtenir la fission de plutonium 239 par des neutrons rapides. «  $N_e$  » peut alors atteindre 2,5 à 3,0 et la surgénération est possible.

C'est pourquoi les réacteurs-surgénérateurs actuels utilisent du Pu239 comme combustible (é. U233) et sont dépourvus de modérateur: les neutrons émis ne sont plus ralentis, et les fissions sont provoquées par des neutrons rapides (on parle, par simplification, de réacteur « rapides » par opposition aux réacteurs « thermiques »).

#### e) *Remarques générales*

1. Pour éviter des pertes de neutrons (capturés, etc.) on doit avoir une forte densité de matière fissile: il faut donc disposer de plutonium produit aupara-

vant, dans des réacteurs thermiques, et extraire du combustible usagé.

2. Les PF étant absorbeurs de neutrons, et leur quantité dans le combustible nucléaire augmentant avec le temps (plus exactement avec l'énergie délivrée), le combustible est progressivement « empoisonné ». De surcroît, dans un réacteur thermique avec C 1, la proportion de matière fissile va diminuer. Il en résulte qu'au bout d'un certain temps (3-4 ans) le combustible n'a plus une qualité suffisante pour que la réaction en chaîne puisse être maintenue. Il doit alors être extrait (par éléments entiers) et remplacé par du combustible neuf.
3. Le combustible usagé doit être retraité si l'on veut en extraire les PF (qui l'empoisonnent), la matière fissile qui subsiste (U235, Pu239) et la matière fertile non transformée (U238). Les matières fissiles et fertile peuvent être réintégrées dans de nouveaux éléments de combustibles. Ainsi, après un certain nombre de cycles, peut-on transformer la totalité de la matière fertile.
4. C'est évidemment là le grand intérêt de la surgénération (et de la conversion pour une part) puisque de 0,7% d'U235 fissile initial, on peut finalement utiliser la totalité des 100% de l'uranium (facteur 140). Il n'est pas nécessaire pour y arriver de ne disposer que de surgénérateurs; selon les facteurs de conversion et de surgénération réalisés, il suffit que 1/3 à 1/4 des réacteurs soient des surgénérateurs.
5. La nécessité de limiter au maximum les pertes de neutrons conduit à choisir, pour l'entraînement de la chaleur dégagée, un fluide à forte capacité calorifique exigeant de faibles sections de passage, donc un métal liquide n'absorbant que peu les neutrons; c'est le sodium qui remplit ces conditions. Il a l'avantage de ne pas entrer en ébullition à température modérée et n'exige donc pas d'être mis sous forte pression (70 à 150 bar pour H<sub>2</sub>O). Sa grande masse donne en outre une importante inertie thermique à l'ensemble. Son inconvénient majeur réside dans son inflammation spontanée au contact de l'eau, problème qui semble aujourd'hui maîtrisé (Superphénix est la 3<sup>e</sup> génération française de ce type; il y a en outre un circuit intermédiaire entre celui au sodium refroidissant le réacteur et celui à vapeur de la turbine, circuit utilisant un eutectique NaK).
6. L'accroissement rapide de la demande mondiale d'énergie avant 1973 (crise du pétrole) avait conduit de nombreux pays à prévoir une extension rapide de la production nucléaire. Compte tenu de l'ampleur limitée des gisements intéressants d'uranium, un recours prochain aux surgénérateurs était envisagé. La France (pas seulement elle) a donc lancé un important programme dans ce domaine, où elle a acquis une expérience remarquable, mais dont la mise en valeur paraît moins proche aujourd'hui. Par sa taille (1200 MWe), Superphénix paraît donc en avance sur les besoins, mais pas quant aux principes et à la technologie. Une dizaine d'autres surgénérateurs sont en construction ou en service ailleurs dans le monde.

## ANNEXE F

# CONSOMMATION DE COMBUSTIBLES EN SUISSE

La consommation suisse en combustibles de toute nature est évidemment influencée par l'effectif de la population résidante, mais aussi par le besoin de chauffage résultant des variations de la température extérieure, et par le coût des combustibles, plus particulièrement de l'huile de chauffage (mazout). Une analyse de l'effet de ces différents facteurs est utile en vue d'une estimation des besoins futurs. C'est l'objet de cette note annexe, étendue aux 15 dernières années (1975-1989), c'est-à-dire après la crise du pétrole de 1973; elle tient donc compte de la prise de conscience de la nécessité d'économie, consécutive à cette crise.

La consommation en combustibles est connue (statistiques de l'Office fédéral de l'énergie), de même que l'effectif de la population, et le prix moyen de l'huile de chauffage (qui constitue les 70% environ des combustibles). On tient compte des variations de la température extérieure en partant de l'idée que le chauffage des locaux ( $20^{\circ}\text{C}$ ) est nécessaire dès que la température extérieure est en moyenne journalière inférieure à  $12^{\circ}\text{C}$ ; à partir des mesures faites dans 40 stations, pondérées par l'effectif de la population résidant

au voisinage de ces stations, on détermine la somme annuelle des «degrés-jours» relative à chaque année.

Le tableau F1 indique tout d'abord pour chaque année la consommation suisse en combustibles (PJ/an), à savoir:

- combustibles pétroliers
- gaz
- charbon (y. c. coke)
- bois
- chaleur à distance
- déchets industriels.

La totalité est, par définition, utilisée à produire de la chaleur, mais pas nécessairement aux seules fins de chauffage de locaux. A cet égard, il est intéressant de noter que sur les 378 PJ de combustibles distribués en 1979

189 PJ l'ont été dans les ménages

95 PJ l'ont été dans l'industrie

94 PJ l'ont été dans l'artisanat, l'agriculture et les services.

| ANNÉE | DONNÉES     |           |         |          |           |         | CALCUL        |  |
|-------|-------------|-----------|---------|----------|-----------|---------|---------------|--|
|       | Comb.tot.PJ | Pop.M.hab | GJ/hab. | °C.jours | Prix réel | GJ/hab. | $\Delta$ GJ/h |  |
| 1975  | 361,73      | 6,405     | 56,48   | 3456     | 103,7     | 56,61   | +0,13         |  |
| 6     | 368,75      | 6,346     | 58,11   | 3409     | 107,7     | 56,20   | -1,91         |  |
| 7     | 367,85      | 6,327     | 58,14   | 3516     | 111,6     | 56,88   | -1,26         |  |
| 8     | 387,01      | 6,337     | 61,05   | 3917     | 96,6      | 60,05   | -1,00         |  |
| 9     | 370,40      | 6,356     | 58,28   | 3716     | 189,4     | 56,79   | -1,49         |  |
| 1980  | 378,14      | 6,385     | 59,22   | 3893     | 181,3     | 58,18   | -1,04         |  |
| 1     | 365,30      | 6,429     | 56,82   | 3613     | 195,3     | 55,93   | -0,89         |  |
| 2     | 347,65      | 6,467     | 53,76   | 3472     | 193,9     | 54,92   | +1,16         |  |
| 3     | 354,57      | 6,482     | 54,70   | 3568     | 174,1     | 56,00   | +1,30         |  |
| 4     | 370,93      | 6,505     | 57,02   | 3811     | 177,1     | 57,68   | +0,66         |  |
| 1985  | 374,30      | 6,534     | 57,28   | 3831     | 182,8     | 57,71   | +0,43         |  |
| 6     | 377,24      | 6,573     | 57,39   | 3700     | 97,4      | 58,48   | +1,09         |  |
| 7     | 389,44      | 6,619     | 58,84   | 3757     | 85,6      | 59,12   | +0,28         |  |
| 8     | 378,96      | 6,671     | 56,81   | 3317     | 71,0      | 56,27   | -0,54         |  |
| 9     | 378,10      | 6,723     | 56,24   | 3345     | 90,4      | 56,08   | -0,16         |  |

Tableau F1 Consommation de combustible en Suisse de 1975 à 1989

De la part consommée par les ménages, on peut penser que l'essentiel sert au chauffage (à l'exception en particulier d'une partie du gaz, au total 26 PJ), environ 175 PJ p. ex. Il n'en est sans doute pas de même des combustibles distribués dans l'industrie, dont une partie, peut-être majeure, est utilisée dans des processus industriels (30 à 40 PJ pour le chauffage?). Par contre, on peut supposer que 85 à 90 PJ des 94 PJ distribués dans le 3<sup>e</sup> secteur servent au chauffage.

Ainsi, le chauffage consommerait environ 300 PJ (environ 80%) des combustibles, sensible aux variations de la température extérieure.

En divisant la totalité des combustibles distribués par l'effectif de la population résidante moyenne (2<sup>e</sup> colonne du tableau) on trouve la consommation par habitant. On voit qu'elle n'a varié que dans des limites assez étroites 57,4 GJ 3,7 (6%) (max. 1978: 61,05 GJ, min. 1982: 53,76 GJ).

Le nombre de °C.j. indique, pour chaque année le total des produits du nombre de jours de chauffage (temp. ext. inf. à 12 °C) par l'écart de température moyenne au-dessous de 12 °C (pondérés par l'effectif de population résidant au voisinage des stations de mesure, comme déjà dit). Il est admis que c'est un paramètre acceptable pour mesurer les besoins de chauffage. Il ne varie pas non plus dans de très larges limites (max. 1978: 3917 °C.j., min. 1978: 3317), soit 3617 ± 300 (8%). L'influence en sera donc réduite.

Le prix indiqué est celui de l'huile légère de chauffage, en valeurs réelles, indexées sur 1973 = 100. Les variations sont ici beaucoup plus sensibles, s'étalant de 71,0 en 1988 à 196,3 en 1981 (effet du 2<sup>e</sup> «choc pétrolier») donc 133,7 ± 62,7 (env. ± 50%). Mais les prix moyens annuels sont nettement départagés en 3 périodes:

1975-78: prix de 96 à 112

1979-85: prix de 174 à 196

1986-89: prix de 71 à 97

Pour mettre tout d'abord en évidence l'effet de la température extérieure, nous avons reporté à la figure F2, la consommation en fonction du nombre des degrés-jours. On y voit clairement apparaître l'accroissement de la consommation entre les années plus chaudes de 1975-1977 et l'année plus froide de 1978, période au cours de laquelle le prix de l'huile est resté bas. Puis on observe de 1979 à 1982 la diminution progressive de la consommation en conséquence de la forte augmentation du prix de l'huile. Dans une troisième période, à prix élevé peu variable, de 1982 à 1985, on constate à nouveau l'accroissement de la consommation consécutive à l'abaissement de la température. Puis, enfin, de 1987 à 1989 l'effet inverse, mais avec des prix à nouveau bas.

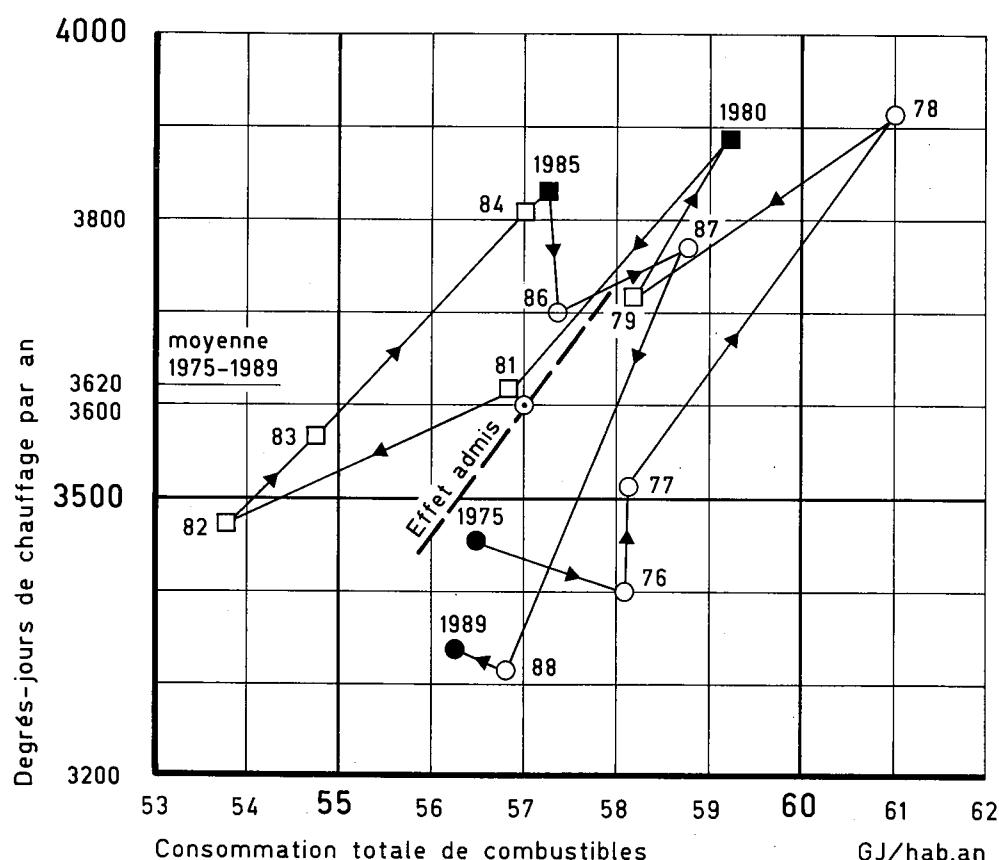


Fig. F2

Influence de la température extérieure et du prix de l'huile de chauffage sur la consommation de combustibles

○ Bas prix de l'huile de chauffage 1975-78 : 96 à 112  
1986-89 : 71 à 97

□ Haut prix de l'huile de chauffage 1979-1985 : 174 à 196  
(prix relatifs réels, 1973 = 100)

## F 3

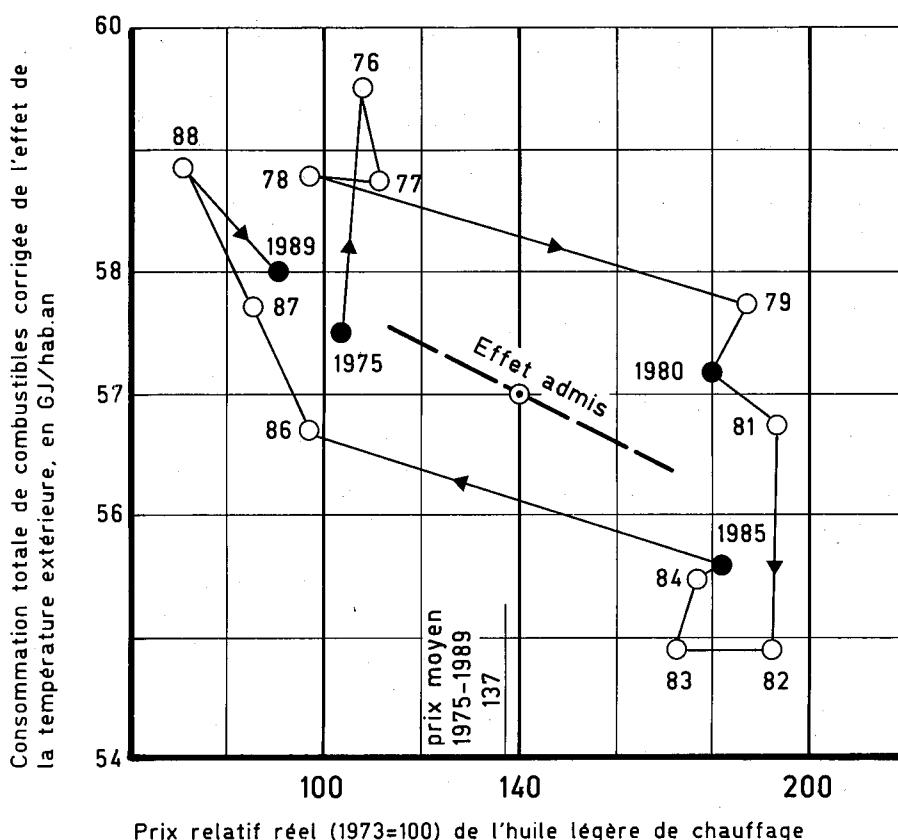


Fig. F3  
Influence du prix de l'huile sur la consommation de combustibles

On remarquera que le groupe des points figuratifs de 1975-1978 se trouve sur une droite moyenne oblique voisine de celle correspondant à la période 1986-1989, légèrement plus à gauche malgré que le prix moyen de cette dernière période (86) soit inférieur à celui de 1975-1978 (105), ce qui aurait pu inciter à une plus forte consommation. Il apparaît donc bien que dans la décennie séparant ces deux périodes, on en soit venu à consommer légèrement moins, toutes choses égales d'ailleurs; peut-être est-ce l'effet de dispositions techniques (meilleure isolation des bâtiments, installations plus performantes) ou d'une prise de conscience de la nécessité d'économiser les combustibles (sans doute les deux!). Mais le graphique montre que le résultat en 10 ans ne dépasse pas l'ordre de grandeur de 2 GJ/hab.an (12 PJ sur 700 à 800: env. 2% à l'échelle du pays ...).

En partant du nombre moyen des degrés-jours en 15 ans (3620, arrondi à 3600), le graphique montre que l'écart par rapport à cette moyenne entraîne un écart de consommation d'environ 5 GJ/hab. pour 700 °C.j., ou **1 GJ pour 140 °C.j. par rapport à 57 GJ/hab.an et 3600 °C.j.**

Après avoir effectué cette correction, pour ramener toutes les années à une température extérieure moyenne, on peut comparer les consommations corrigées au prix de l'huile légère de chauffage. C'est l'objet de la figure F3.

On y observe qu'au moment des fortes variations du prix, l'effet sur la consommation a été semblable qu'il se soit agi de l'augmentation entre 1976-78 et 1979-81 ou de la diminution entre 1982-85 et 1986-87. Dans les

deux cas, il y eut environ **1 GJ/hab. d'écart pour une variation de prix de 50**. Le prix moyen a été de 137, arrondi à 140, pour 57 GJ/hab. On vérifie en outre l'écart d'environ 2 GJ entre les deux variations à une décennie d'intervalle.

Nous disposons ainsi de la possibilité d'estimer la consommation C en combustibles distribués en tenant compte de la température moyenne extérieure de l'année considérée (N = nombre de degrés-jours) et du prix réel relatif P (1973 = 100) de l'huile de chauffage:

$$C = 57 + (N-3600)/140 - (P-140)/50$$

ou

$$C \text{ en GJ/hab.an} = 34 + \frac{N}{140} - \frac{P}{50}$$

Les deux dernières colonnes du tableau F1 donnent la consommation ainsi calculée et l'écart par rapport aux valeurs des statistiques. L'écart moyen (en valeur algébrique) est de 0,22 GJ; il provient principalement des années 1975-78 durant lesquelles l'effet de la crise du pétrole ne se faisait pas encore pleinement sentir (bas prix de l'huile). Cet écart diminue à 0,07 GJ si l'on ne considère que les 11 années 1979-1989 englobant le 2<sup>e</sup> choc pétrolier.

L'intérêt de cette analyse, et de la formule établie, ne réside pas, du point de vue pratique, dans la possibilité de prévoir ainsi la consommation future: la température extérieure ne va pas, en moyenne, varier significativement de 1990 à 2010; quant au prix de l'huile, il serait hasardeux de le prédire (notamment au moment, février 1991, où ces lignes sont écrites...). L'intérêt est de quantifier ces deux influences.

L'influence de la température extérieure reste limitée à  $\pm$  (1 à 2) GJ/hab.an et elle devrait s'annuler statistiquement sur une longue période.

Quant à l'effet de variation de prix de l'huile de chauffage, on peut être surpris qu'il ne soit pas plus important. Son doublement par rapport à celui de 1989 (90 passant à 180) entraînerait une diminution de consommation inférieure à 2 GJ/hab. (12 PJ pour la Suisse).

Peut-être la cause en doit-elle être recherchée dans le niveau de vie élevé des Suisses. Leur pouvoir d'achat leur permet de privilégier leur confort, et d'en payer le prix. Nous avons fait une observation semblable en ce qui concerne les carburants (dont la consommation par habitant n'a diminué, très temporairement, que de moins de 2 GJ, alors que le prix augmentait de 50%).

Pour tenter une prévision de consommation de combustibles durant les 20 ans à venir, nous nous sommes donc bornés à admettre que la consommation par habitant n'augmenterait pas, malgré l'accroissement du niveau de vie, et conserverait la valeur de 56,2 GJ/hab.an observée en 1989, valeur inférieure d'environ 1 GJ à la moyenne de ces dernières années.

## ANNEXE G

# CONCEPT DE L'EXERGIE

### § 1. Introduction

Dans la présente étude, toutes les énergies sont indiquées en «joules» (J), dont il a été dit que c'est l'unité du Système International de mesures(SI). Par exemple, 1 J d'électricité ou de travail mécanique permet bien de dégager exactement la même quantité de chaleur que 1 J de combustible ou de carburant, les installations étant supposées parfaites (si elles ne le sont pas, il y a une perte, mesurée par un rendement inférieur à 100%). Ainsi, 1 kWh vaut-il 3 600 000 J (par définition, 1 W = 1 J/sec), ou 1 calorie est-elle égale à 4,186 J, etc.

*Cependant, les possibilités d'utilisation offertes par une certaine quantité Q de chaleur dépendent également d'une seconde grandeur, sa température.*

Avec la chaleur à 1000 °C, on ne peut pas fondre du fer; à 200 °C, elle ne permet pas de fondre du plomb, et à 80 °C elle ne permet même pas de porter de l'eau à ébullition (à la pression atmosphérique). Du point de vue de l'utilisateur, la valeur de cette quantité de chaleur dépend donc de sa température. Pour le gestionnaire et l'économiste, il faudrait tenir compte non seulement des quantités d'énergie (que l'on compare ou additionne), mais également de ce qu'on pourrait appeler la «qualité» de cette énergie. *Or, tel n'est pas le cas des statistiques établies, dans lesquelles les énergies sont données sans se préoccuper de leurs qualités éventuellement différentes.*

L'objet de la présente Annexe est de montrer comment l'on peut, de manière satisfaisante, tenir exactement compte du niveau de température d'une quantité de chaleur et, d'une manière générale, de la qualité d'une énergie, grâce au concept d'«exergie». Il devient alors possible de mieux localiser et quantifier des pertes non négligeables, ce qui est important dès lors que l'on entend lutter contre ces pertes. Ce concept permet également de comprendre, par exemple, que l'on puisse obtenir, grâce à une pompe à chaleur, plus d'énergie qu'on ne lui en fournit (ce qui, à première vue, est contraire au principe de la conservation de l'énergie).

### § 2. Définitions

*L'exergie d'une quantité donnée d'énergie est mesurée par le travail mécanique que l'on peut en tirer (ce que*

*souligne le préfixe «ex»), à l'aide d'installations parfaites, quelle que soit la forme de l'énergie: chaleur potentielle d'un combustible ou chaleur transportée par un fluide, énergie solaire, hydraulique, ou autre. L'exergie, parfois désignée par «énergie utilisable», se mesure en joules, comme l'énergie.*

Dans de nombreux cas, l'exergie est simplement égale à l'énergie telle que calculée usuellement; par exemple:

- énergie mécanique potentielle d'une quantité d'eau disponible à une altitude donnée, par rapport à une autre altitude,
- énergie mécanique cinétique (masse tournante, fluide se déplaçant),
- énergie électrique, car elle peut être intégralement transformée en énergie mécanique (par exemple grâce à un moteur électrique parfait).

Cependant, il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit de chaleur. Celle-ci peut être transformée en travail mécanique, mais seulement par l'utilisation d'un «cycle moteur», dont l'efficacité va dépendre de la nature du cycle et des températures en jeu. On parle alors communément de «rendement» d'un tel cycle, rapport entre le travail obtenu et la chaleur fournie. Il faut souligner ici que ce «rendement» n'est pas une mesure des imperfections du cycle (donc des pertes qu'il occasionne) puisque l'installation est supposée parfaite, donc sans pertes. A cet égard, le terme d'«efficacité motrice» est plus satisfaisant. Cette efficacité motrice dépend fortement des températures entre lesquelles le cycle se développe (variant en pratique entre 0,1 et 0,7 par exemple).

*Dès lors, l'exergie EX sera le produit de la chaleur Q par l'efficacité motrice «em».*

$$EX = Q \cdot em$$

L'importance des modifications qui en résultent ressort immédiatement du fait que, par exemple, une très grande proportion, plus des 9/10, de l'énergie primaire mondialement consommée provient de combustibles dont l'utilisation dégage précisément de la chaleur. L'exergie primaire correspondante sera plus faible que l'énergie. Ce sera encore beaucoup plus le cas au niveau de l'énergie utile si celle-ci est constituée de chaleur à basse température.

**L'intérêt du calcul en énergie tient à la possibilité d'additionner ensuite les exergies provenant de différentes sources, addition entièrement correcte puisque tout travail mécanique peut être intégralement transformé en un autre, sans aucune perte, du moment que l'installation de transformation est présumée parfaite.**

Il importe ici de bien réaliser qu'une quantité de chaleur  $Q$  à une température  $T_2$  n'a une valeur pour un utilisateur que par rapport à une température inférieure  $T_1$  (tout comme une masse d'eau de poids  $P$  située à une altitude  $H_2$  n'a de valeur pour un utilisateur que par rapport à une altitude inférieure  $H_1$ : la chute de la masse d'eau du niveau supérieur au niveau inférieur libérera un travail mécanique  $W = P(H_2 - H_1)$ ). C'est entre ces deux températures supérieure  $T_2$  et inférieure  $T_1$ , que sera établi le cycle moteur d'efficacité motrice «em», qui libérera le travail mécanique qui constitue l'énergie EX disponible.

Il reste donc, pour déterminer «em», à choisir le cycle moteur. Celui qui conduit à la formulation la plus simple de «em», et qui dégage le travail maximal, est le cycle dit de Carnot; on a alors

$$em_c = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (1)$$

( $T_1$ ,  $T_2$ : températures absolues, en Kelvin = °C + 273) où  $em_c$  est le «coefficent de Carnot» bien connu.

Mais ce cycle n'est généralement pas réalisable en pratique et l'usage de «em<sub>c</sub>» conduit à surestimer l'énergie à disposition. Nous lui préférons donc un cycle dans lequel la chaleur disponible  $Q$  est transférée à pression constante à un fluide que l'on échauffe de  $T_1$  à  $T_2$  (cycle à chauffage isobare). La détente ultérieure du fluide dégagera le travail mécanique correspondant à

$$em = 1 - \frac{T_1}{T_2 - T_1} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (2)$$

( $T_1$ ,  $T_2$  températures absolues).

Le calcul conduisant à cette valeur de em est donné au § 4 de la présente Annexe.

Le concept énergétique modifie la présentation du bilan énergétique d'un pays (la Suisse, p. ex.), et conduit à une appréciation sensiblement différente de la situation (voir Annexe H). Il paraît donc nécessaire de bien se convaincre que cette présentation énergétique est la seule correcte, alors même qu'elle n'est pas encore utilisée dans les statistiques nationales ou internationales. Dans ce but, nous l'appliquerons à deux exemples simples.

### § 3. Deux exemples de calcul énergétiques

#### a) Chauffage d'un immeuble

Il est communément admis que le rendement d'une installation de chauffage central d'un immeuble atteint l'ordre de grandeur de 80 à 90 %. En effet, l'installateur constate que pour 100 J de chaleur dégagés dans le foyer de la chaudière (par la combustion d'une quantité donnée de combustible), environ 85 J sont cédés par les radiateurs à l'air des locaux à chauffer.

Le rendement est ainsi de  $85/100 = 85\%$ , 15 % étant perdus lors de l'évacuation des gaz de combustion par la cheminée, ainsi qu'on le voit sur la figure schématique G1.

Pour nous, cependant, d'un point de vue énergétique, les 100 J dégagés à 1200 °C (p.ex.) dans le foyer ne valent que le travail mécanique que l'on en pourrait tirer grâce à un cycle moteur à chauffage isobare; il faut multiplier ces 100 J par la valeur de «em» correspondant aux températures  $T_2 = 1200 + 273 = 1473$  K et  $T_1 = 5 + 273 = 278$  K (étant donc admis que la température extérieure est à ce moment de 5 °C); «em» vaut ainsi 0,61 et l'exergie dégagée par la combustion s'élève à 61 J.

Les 90 J délivrés par les convecteurs le sont à 70 °C en moyenne (on néglige ici les écarts de température, limités, le long du circuit de chauffage). Pour cette température de 70 °C, «em» n'est que de 0,10 et les 90 J ne valent que 9 J en énergie. La chaleur, 90 J, est délivrée au local, à 20 °C, et l'énergie transférée (avec l'écart de température de  $70^\circ - 20^\circ = 50^\circ$ ) vaut 7 J. Le local perd ensuite ces 90 J (avec l'écart de température de  $20^\circ - 5^\circ = 15^\circ$ ), c'est-à-dire 2 J en énergie.

Le rendement de l'installation est dès lors de  $7/66 = 11\%$ .

Les pertes sont très notablement supérieures à ce qui était évalué en énergie: 89 % au lieu de 10 %. Et, ce qui est particulièrement important, elles n'ont pas la cause supposée: elles proviennent essentiellement de ce que rien n'a été fait du saut de température de 1200 °C à 70 °C («image» hydraulique: on alimente en eau les habitants de Sion avec de l'eau de la Grande Dixence, sans turbiner cette eau au passage...).

On se demande tout naturellement s'il serait possible d'éviter cette perte. Quant au principe, il suffirait d'intercaler une petite turbine à gaz entre le foyer et le circuit de chauffage; le circuit serait chauffé par les gaz de combustion à basse température à la sortie de la turbine. En simplifiant un peu le calcul, nous constaterions que la turbine à gaz entraînerait une génératrice délivrant 40 J en électricité (pour laquelle «em» = 1,0 car intégralement transformable en travail mécanique), donc 40 J en énergie; 20 J étant perdus, 40 J seraient transférés aux radiateurs, mais ne vaudraient que 4 J en énergie. Dès lors, le rendement de l'installation serait de  $(40 + 4)/57 = 77\%$ .

D'un point de vue pratique, il est clair que pour appliquer cette solution il conviendrait de grouper tous les immeubles d'un quartier et de les raccorder par un réseau de chauffage à distance à une unique centrale à turbine à gaz (ou analogue), centrale dite du type «chaleur-force».

Puisque la perte établie par le calcul énergétique peut être évitée, c'est qu'elle est bien réelle. Le calcul usuel, déterminant les énergies primaires, distribuées et utiles, dans les statistiques apparaît ainsi comme donnant une vue fondamentalement erronée.

#### b) pompes à chaleur

Quant à son principe, une pompe à chaleur peut être présentée comme une mini-centrale thermique fonc-

G 3

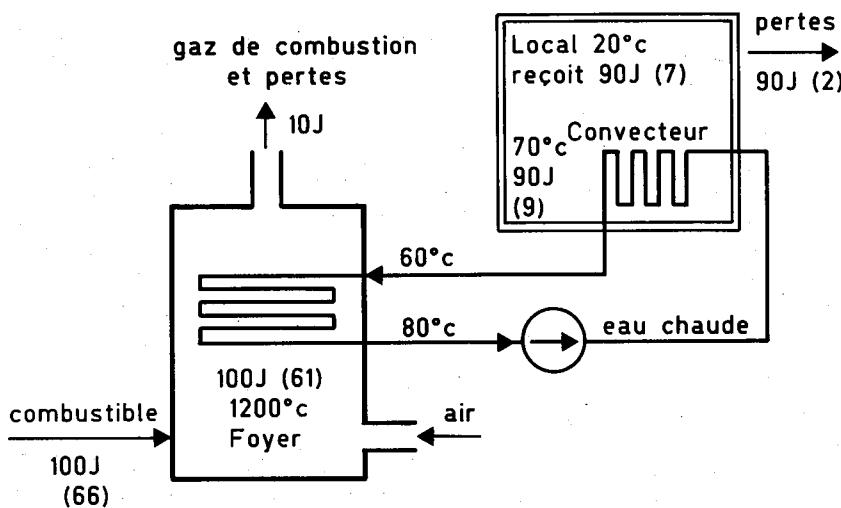


Fig. G1  
Schéma d'une installation de chauffage  
( ) energie avec  $T_1$  = temp. extérieure 5 °C

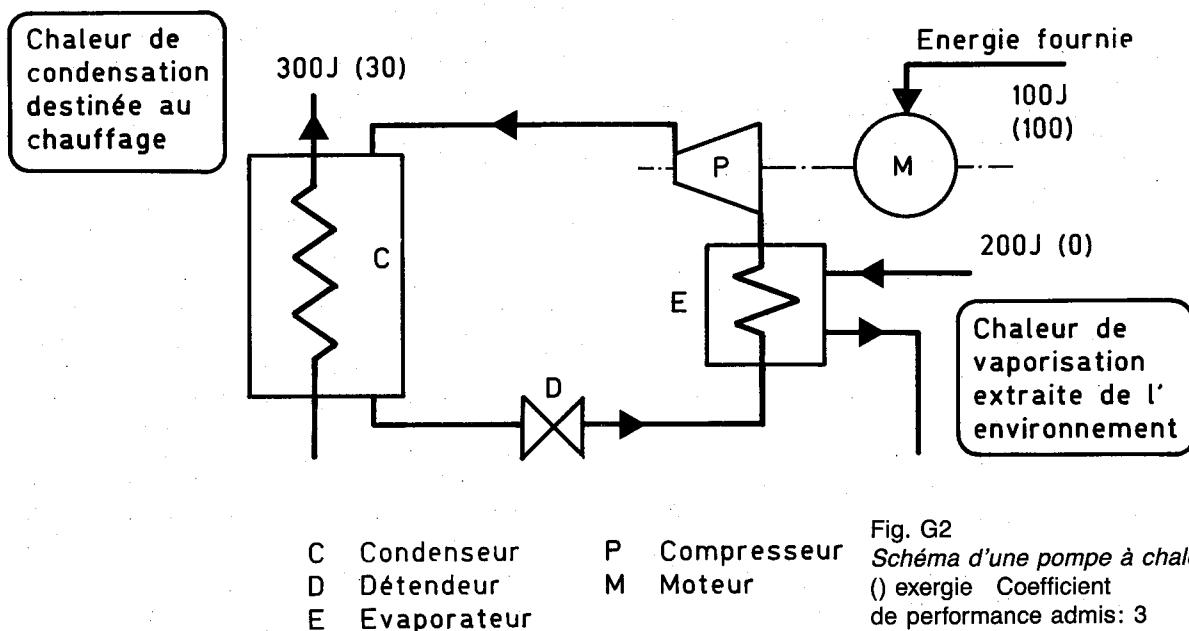


Fig. G2  
Schéma d'une pompe à chaleur  
( ) energie Coefficient de performance admis: 3

tionnant en sens inverse, ainsi que le montre la figure G2. On peut également dire qu'une pompe à chaleur est, dans son principe, identique à un réfrigérateur, tel qu'il en existe dans nos cuisines.

A ce réfrigérateur, on fournit 100 J d'électricité; il pré-lève 200 J de chaleur à ce qui a été placé à l'intérieur et il restitue 300 J de chaleur à la cuisine, qu'il réchauffe.

Note: Au moment où le contenu du réfrigérateur en est sorti, il refroidit la cuisine des mêmes 200 J, ce qui fait qu'en définitive, le réfrigérateur n'est qu'un chauffage électrique à raison de 100 J, et il ne fait, quant aux 200 J, que les stocker en valeur négative!

Que la ménagère place son réfrigérateur sur sa fenêtre, porte ouverte vers l'extérieur mais restitution de la chaleur vers la cuisine, et elle le fait fonctionner en pompe à chaleur: les 200 J sont prélevés à l'environnement et viennent chauffer le local. Fournissant 100 J d'électricité, on obtient 300 J de chauffage, ce pourquoi certains voient alors dans l'environnement une source de chaleur, et parlent de «chaleur de l'environnement».

Mais le calcul exergétique conduit à une vue différente: les 100 J d'électricité fournis valent 100 J en énergie. Par contre, les 300 J de chaleur fournie au local, à basse température ne valent guère que 30 J

en énergie («em» de l'ordre de 0,1). Le rendement, d'environ 30%, reste modeste, la pompe étant peu performante et ses pertes notables.

Il n'en reste pas moins que l'utilisation de pompes à chaleur améliore d'un facteur d'environ 3 (coefficient de performance) la situation correspondant à un simple chauffage électrique. La pompe permet donc de tirer parti de la haute qualité de l'électricité, tout au moins dans une certaine mesure.

Note: Le facteur théorique maximal est l'inverse de l'efficacité motrice correspondant aux mêmes températures; pour des valeurs de  $T_1 = 5^\circ\text{C} = 278\text{ K}$  et  $T_2 = 70^\circ\text{C} = 343\text{ K}$ , on trouve  $\text{em} = 0,10$  et un coefficient de performance de 10. En pratique, il est bien inférieur (3 à 4).

#### § 4. Efficacité motrice et cycles moteurs

Note: La présentation qui suit est quelque peu simplifiée; on trouvera une présentation complète du point de vue thermodynamique, dans «Energie, Economie et Prospective», A. Gardel. Pergamon Press 1979, p. 79 et ss, et p. 134 et ss.

Il est commode pour l'étude des cycles moteurs de définir l'état d'un fluide compressible par les deux «variables d'état»: température absolue  $T$  et entropie  $S$ , où  $S$  est fixé par la différentielle  $dS = dQ/T$ . Les changements d'état du fluide sont représentés sur le diagramme entropique (coordonnées  $T$ ,  $S$ ). On peut sur ce diagramme tracer un réseau d'isobares (lieux des états à pression constante).

Lors d'un petit changement d'état, faisant passer de  $X$  à  $X'$  dans le diagramme, la chaleur reçue  $dQ$  est mesurée par la surface située audessous de  $XX'$ , égale à  $T \cdot dS = dQ$ . Ainsi, lorsque le fluide passe de l'état  $A$  à l'état  $C$  par une succession de transformations représentées par la courbe  $ABC$ , la chaleur totale reçue  $Q_2$  est la surface  $A_0 A B C C_0 A_0$  indiquée sur la figure G3. Si le cycle est fermé en suivant les transformations représentées par la courbe  $CDA$ , le fluide, passant de  $C$  à  $A$  (état initial) restitue la chaleur  $Q_1$  mesurée par la surface  $C_0 C D A A_0 C_0$ , plus petite que  $Q_2$ . Dès lors, le travail mécanique délivré par le cycle complet est

$$W = Q_2 - Q_1 \quad (3)$$

de sorte que soit satisfait le 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (conservation de l'énergie). Ce travail est donc mesuré par la surface située à l'intérieur de la courbe fermée  $A B C D A$ .

Ce travail sera maximal entre les températures extrêmes  $T_2$  et  $T_1$  (et les pressions  $P_{\max}$  et  $P_{\min}$ ) si le cycle est représenté par le rectangle limité par  $S_{\max}$  et  $S_{\min}$ . C'est le cycle de Carnot (fig. G4).

On voit immédiatement que la chaleur  $Q_2$  fournie au fluide est alors proportionnelle à  $T_2$  tandis que le travail l'est à  $T_2 - T_1$

$$W/Q_2 = (T_2 - T_1)/Q_2 \quad (4)$$

et il en résulte que le coefficient de Carnot est

$$\text{em}_c = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (5)$$

comme indiqué plus haut.

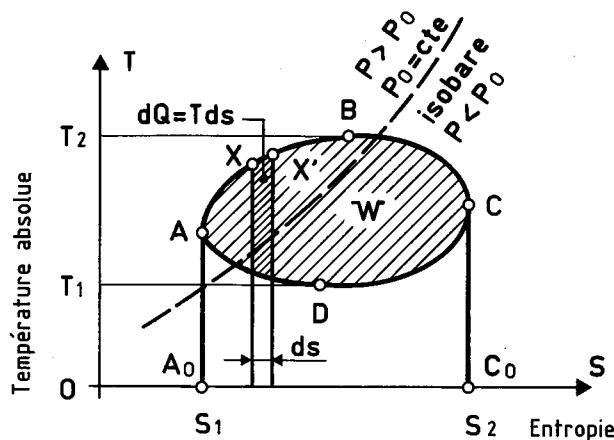


Fig. G3 Diagramme entropique

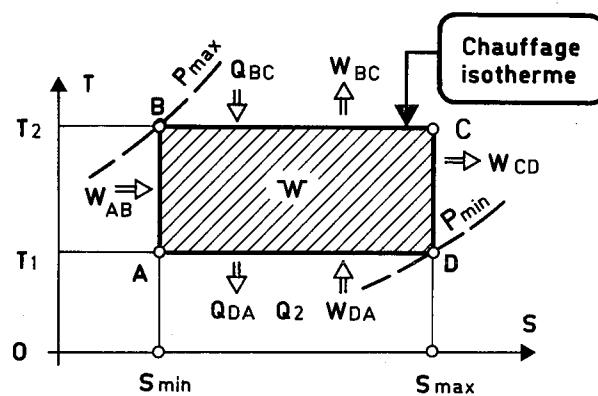


Fig. G4 Cycle de Carnot

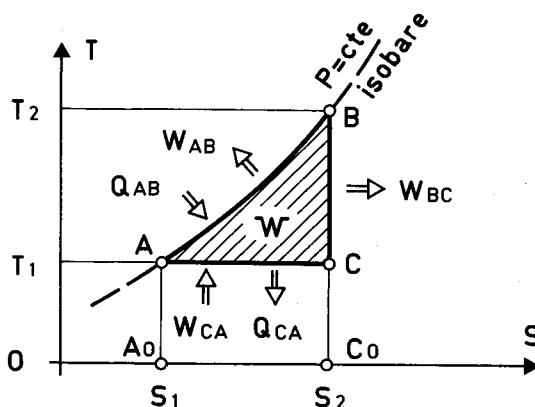


Fig. G5 Cycle à chauffage isobare

## G 5

Note: En passant de A à B (ou de C à D), il y a compression (ou détente) isentropique, sans échange de chaleur, absorbant un travail  $W_{AB}$  (ou dégageant un travail  $W_{CD}$ ); en passant de B à C (ou de D à A) il y a détente isotherme (ou compression isotherme) absorbant une chaleur  $Q_{BC}$  et dégageant un travail  $W_{BC}$ , égal à  $Q_{BC}$  (ou dégageant une chaleur  $Q_{DA}$  mais absorbant un travail  $W_{BC}$ , égal à  $Q_{DA}$ ).

Cependant, en pratique, on ne chauffe pas le fluide à température constante (tronçon BC, chauffage isotherme du cycle de Carnot), mais on le chauffe à pression constante (aux pertes de charge près du circuit du fluide). Puis, la température  $T_2$  étant atteinte, on procède, par exemple dans une turbine, à une détente isentropique, donc sans échange de chaleur avec l'extérieur (aux pertes de chaleur près), jusqu'à la température inférieure  $T_1$ . Cette dernière est fixée par la possibilité pratique d'extraire sans difficulté la chaleur  $Q_{CA}$  (figure G5). Ce sera le cas si  $T_1$  est voisin de la température  $T_a$  extérieure, ambiante (identique à  $T_1$  pour une installation parfaite).

$$\text{Puisque } W = Q_2 - Q_1 \quad (3)$$

$$\text{em} = \frac{W}{Q_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} \quad (6)$$

$$\text{Or } Q_1 = (S_2 - S_1)T_1 \text{ (surface } C_o C A A_o C_o)$$

que l'on peut calculer s'agissant d'un fluide parfait à chaleur massique admise constante C:

$$dQ = C \cdot dT \text{ et } dQ = T \cdot dS \text{ d'où } dS = C \cdot dT/T \quad (7)$$

$$\text{et } S_2 - S_1 = C \cdot \ln(T_2/T_1) \quad (8)$$

$$\text{qui conduit à } Q_1 = C \cdot T_1 \cdot \ln(T_2/T_1) \quad (9)$$

D'autre part

$$Q_2 = C \cdot (T_2 - T_1) \text{ par définition de C} \quad (10)$$

Il en résulte que

$$\text{em} = 1 - \frac{T_1}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$(11) = (2)$$

déjà indiqué plus haut.

Note: Il n'est pas sans intérêt de remarquer que le fluide, initialement à l'état A, puis recevant la chaleur de chauffage  $Q_{AB}$  le conduisant à l'état B, en subissant la détente isentropique l'amenant à l'état C, s'y retrouve à la température initiale  $T_1$ . La température étant une mesure de l'énergie cinétique moyenne des particules, énergie dite «interne», cette énergie interne est la même en C qu'en A. Cela signifie qu'ayant subi les transformations suivant A B C, la totalité de la chaleur fournie  $Q_1 = Q_{AB}$  est transformée en travail mécanique lorsque le fluide atteint l'état C. En d'autres termes, après détente isentropique, toute la chaleur fournie est transformée en travail mécanique; le «rendement» de la transformation est alors de 1,00.

Mais en C, la pression est inférieure à celle en A, donc notamment inférieure à la pression atmosphérique si c'est celle en A. Le fluide (p.ex. gaz de combustion dans une installation à turbine à gaz) ne peut pas être rejeté dans l'environnement. Il faut au préalable le comprimer, et c'est ce qui se passe lorsqu'on ferme le cycle en passant de C à A.

Quant au principe, la transformation intégrale de la chaleur en travail mécanique n'est donc nullement une impossibilité; elle pourrait se faire en prenant  $T_1 = 0$ , c'est-à-dire en réalisant la transformation CA à la température du zéro absolu (cycle  $A_o A BC C_o A_o$ ), mais cela n'entre pas dans les possibilités pratiques.

Cette remarque souligne le fait qu'en définissant l'exergie (fût-ce par le cycle de Carnot), on se limite à ce qui est pratiquement possible (par le choix de  $T_1$ ); et cela justifie que nous n'ayons pas retenu un cycle de Carnot pour définir «em» puisqu'on ne peut pas en pratique transférer la chaleur de combustion à température  $T_2$  constante.

## ANNEXE H

# LE BILAN EXERGÉTIQUE SUISSE

### § 1. Introduction

Quoique, ainsi que nous l'avons indiqué, toutes les statistiques, internationales ou nationales, soient établies sans recourir au concept de l'exergie (non sans quelques tentatives, discutables de corriger les distorsions existantes, p. ex. en valorisant l'électricité), il n'en reste pas moins que le calcul en énergie est seul correct, et permet donc de bien situer les pertes et leur ampleur, ainsi que les rôles relatifs exacts des différentes sources ou formes de l'énergie utilisée. Il s'agit donc ici d'une question fondamentale, et nous ne citerons dans cette introduction qu'un exemple de l'incohérence des définitions utilisées: l'énergie hydraulique primaire, quand elle n'est pas simplement comptée pour l'électricité qu'on en tire (ce qui est encore plus inexact) est admise égale à celle de l'énergie potentielle de gravité de l'eau captée, entre l'altitude de captage et celle de restitution; c'est ainsi que procède l'OFEN et on peut lui donner raison sur ce point. Mais l'énergie primaire des combustibles, qui constitue la majeure partie des énergies primaires, est comptée pour la chaleur potentielle de combustion de ces combustibles; ce calcul ne tient aucun compte des températures en jeu, qui sont pourtant déterminantes quant à la «qualité» d'une chaleur; on calcule ainsi comme si l'on était en mesure de réaliser des cycles thermiques passant par le zéro absolu (- 273 °C) ou par une température infiniment haute, toutes choses impossibles en pratique. On surestime donc sensiblement l'énergie primaire des combustibles. En d'autres termes, et sans y prendre garde, on ne calcule pas de la même manière l'énergie primaire hydraulique et celle des combustibles, et il est dès lors incorrect de les additionner.

Il nous a donc paru utile de donner ci-après la comparaison du bilan énergétique suisse calculé simplement en énergie ou en exergie.

Pour cela, il convient tout d'abord de préciser le mode de calcul utilisé.

### § 2. Définitions

Rappel: l'exergie est, pour toutes les formes d'énergie, le travail mécanique maximal qu'on en peut tirer en recourant à des installations parfaites.

S'il s'agit de chaleur, il faut choisir un cycle moteur, et nous avons choisi un cycle à chauffage isobare, entre deux températures absolues  $T_1$ , et  $T_2$  définies (voir Annexe G). L'énergie Ex est alors, pour une quantité Q de chaleur, égale à  $Q \cdot em$ , où «em» est l'efficacité motrice

$$em = 1 - \frac{T_1}{T_2 - T_1} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

#### a) Energie primaire

- **Combustibles:** Pour  $T_1$  nous avons pris 15 °C = 288 K, température moyenne ambiante. Pour  $T_2$  on peut prendre une température de flamme moyenne de 2 200 K (1 927 °C), maximum possible lors de combustion avec de l'air, à la pression atmosphérique (conditions stoechiométriques); on trouve alors  $em = 0,7$ . Le pouvoir calorifique des combustibles est réduit de 30%. Cependant, il semble difficile en pratique de dépasser 1500 °C, ce qui conduit à  $em = 0,65$ , et le pouvoir calorifique des combustibles est réduit de 35%; c'est ce que nous prenons.

- **Hydraulique:** Energie potentielle de l'eau captée, comme indiqué plus haut.

- **Nucléaire:** Le combustible importé contient une quantité déterminée de matière fissile (U235) dont la fission complète dégage 82 TJ/kg U235; cependant ce combustible sera retiré du réacteur avant que ne se soit produite cette fission complète (le combustible est progressivement «empoisonné» par les produits de fission, et sa teneur en matière fissile baisse au fur et à mesure qu'elle est consommée). Mais de l'U235 est perdu lors de l'enrichissement; par ailleurs une part limitée de l'uranium 238, non fissile, est transformée en plutonium 239, fissile, dont une certaine proportion fait l'objet de fissions, ce qui accroît l'énergie dégagée. Il faut aussi noter que l'énergie de fission peut en principe être dégagée à une température supérieure à 2200 K (combustibles fossiles), mais qu'une petite part ne peut être captée (neutrinos): le potentiel énergétique du combustible importé va ainsi dépendre de la manière dont il est utilisé, c'est-à-dire du type du réacteur. On peut prévoir d'utiliser, après retraitement, la matière fissile restant dans le combustible

## H 2

retiré du réacteur; on pourrait même (et ce sera peut-être le cas dans quelques décennies) utiliser l'uranium 238 (97 à 98% du combustible importé) grâce à un cycle comportant la transmutation en plutonium et la surgénération. Il y a donc de multiples manières d'évaluer l'énergie primaire du combustible importé.

Partant de l'énergie qui pourrait être dégagée par la fission complète de la matière fissile initialement incluse dans l'uranium naturel utilisé, de la perte de matière fissile se produisant lors de l'enrichissement (à 3% p. ex.), du gain de matière fissile résultant de la conversion (p. ex. coefficient de conversion de 0,6), et en soustrayant la valeur énergétique de la matière fissile restante, non utilisée, on trouve l'ordre de grandeur de 450 GJ/kg U naturel. Le combustible importé inclut l'énergie de la matière fissile restante et l'on peut majorer le chiffre ci-dessus d'un tiers environ. L'énergie potentielle ainsi obtenue peut être supposée dégagée à la même température d'environ 2200 K, ce qui conduit à la multiplier par une efficacité motrice  $em$  de 0,7. L'ergie ainsi obtenue, d'environ 420 GJ/kg U nat utilisé, est à peu près égale à la chaleur effectivement dégagée dans le réacteur (450 GJ – 5% neutrinos).

Ainsi peut-on, pour le combustible nucléaire, admettre une énergie égale à la chaleur qui sera effectivement dégagée dans le réacteur. C'est la valeur adoptée, quoique pour d'autres raisons, dans les statistiques de l'OFEN. Ce mode de faire ne vaut cependant qu'à condition que ne soient pas modifiés les taux d'enrichissement et les facteurs de conversion, et que l'on ne prenne pas en compte les possibilités offertes par le retraitement, l'utilisation ultérieure du plutonium et la surgénération.

Il n'en reste pas moins qu'en pratique on est loin de dégager la chaleur à 2200 K, cela par suite des limites imposées par la tenue du combustible; la vapeur n'est ainsi produite qu'à environ 300 à 350 °C. Tant qu'il s'agit de réacteurs thermiques actuels, on devrait donc considérer que la chaleur n'est dégagée qu'à 300 à 350 °C, ce qui conduit à  $em = 0,32$  (pour  $T_1 = 15$  °C) au lieu de 0,7 avec 2200 K. Le potentiel énergétique du combustible nucléaire apparaît ainsi surestimé d'un facteur 2 dans la statistique usuelle.

### b) Energie distribuée (finale)

- **combustibles:** même calcul que ci-dessus ( $em = 0,65$ )
- **électricité:** peut être transformée intégralement en travail mécanique ( $em = 1,0$ , p.m. installations parfaites)
- **carburants:** comme les combustibles, à ce stade (avant utilisation), donc  $em = 0,65$
- **chaleur à distance,** distribuée entre 100 et 150 °C, efficacité motrice moyenne:  $em = 0,15$ .

### c) Energie utile

- **chaleur:** sa valeur en énergie dépend de sa tem-

pérature; nous avons estimé sa répartition en 3 niveaux:

- haute température 500 à 1000 °C  $em = 0,5$
- moyenne température 200 à 400 °C  $em = 0,3$
- basse température 50 à 120 °C  $em = 0,1$
- **travail mécanique:** il est de l'exergie par définition, et  $em = 1,0$
- **chimie:** s'agissant d'électricité investie dans des processus chimiques, théoriquement réversibles, et ne concernant que de très faibles quantités d'énergie, nous avons adopté  $em = 1,0$  pour simplifier
- **lumière:** les énergies en jeu sont si faibles que le choix de « $em$ » est sans conséquence; compte tenu de ce que la température correspondante est élevée (plus de 1000 °C), nous avons admis aussi  $em = 1,0$ .

## § 3. Situation suisse en 1989

### a) Energie primaire

Le tableau H1 (p. 144 H 5) donne le bilan énergétique, en énergie (selon OFEN) et en exergie.

Calculé en exergie, le total de l'énergie primaire consommée en 1989 est inférieur de 1/3 (34%) à celui de la statistique (OFEN), quoique cette dernière ne compte ni l'hydraulique, ni le nucléaire pour l'électricité (dite primaire) qu'on en tire, comme cela se fait dans la statistique de l'ONU, qui donne pour la Suisse 720 PJ seulement.

### b) Energie distribuée (finale)

Le bilan suisse en énergie distribuée est donné au tableau H2 (p. 145 H 6), en énergie et en exergie.

Comme on pouvait s'y attendre, l'exergie distribuée est inférieure, de 35%, à l'énergie. Les combustibles jouent un rôle un peu inférieur (44% au lieu de 49%), tandis que la part de l'électricité croît notablement, passant de 21% à 29%. Cette dernière constatation est significative du fait que la statistique nationale minimise le rôle de l'électricité au stade de l'énergie distribuée.

L'OFEN a déterminé (voir chap. 5) la répartition de cette énergie distribuée entre les diverses catégories de consommateurs (les combustibles pétroliers et les carburants y sont groupés, mais il est clair que la part affectée aux transports n'est que des carburants et que les carburants utilisés dans l'industrie ou ailleurs ne le sont qu'en faible quantité).

Le tableau H3 (p. 147 H 8) indique la répartition de l'énergie distribuée, en énergie et en exergie, selon la nature de l'énergie et selon les catégories de consommateurs.

Ce tableau fait ressortir que

- (lignes 14 et 16) la forte consommation des ménages (30%, sans les transports individuels) et des transports (29%), qui se partagent les 3/5 de l'énergie distribuée, alors que l'industrie n'en prend que 1/5

Tableau H1 *Energie primaire (1989)*

| 1989<br>SOURCES                                    | Energie selon OFEN |            | Energie |            |            | Exergie |  |  |
|--|--------------------|------------|---------|------------|------------|---------|--|--|
|  | PJ                 | %          | em      | PJ         | %          |         |  |  |
| Combustibles indigènes<br>(bois, ordures, déchets) | 35                 | 3          | 0,65    | 23         | 3          |         |  |  |
| Hydraulique  | 137                | 14         | 1,0     | 137        | 21         |         |  |  |
| Sous-total indigène                                | <b>172</b>         | <b>17</b>  |         | <b>160</b> | <b>24</b>  |         |  |  |
| Combustibles et carburants importés                |                    |            |         |            |            |         |  |  |
| pétrole brut                                       | 128                | 13         | 0,65    | 83         | 12         |         |  |  |
| produits pétroliers                                | 398                | 39         | 0,65    | 259        | 39         |         |  |  |
| gaz  | 71                 | 7          | 0,65    | 46         | 7          |         |  |  |
| charbon  | 15                 | 2          | 0,65    | 10         | 1          |         |  |  |
| Sous-total com. et carb. importés                  | <b>612</b>         | <b>61</b>  | 0,65    | <b>398</b> | <b>61</b>  |         |  |  |
| Combustible nucléaire                              | <b>235</b>         | <b>23</b>  | 0,35    | <b>107</b> | <b>16</b>  |         |  |  |
| Solde exportateur d'électricité                    | -8                 | -1         | 1,0     | -9         | -1         |         |  |  |
| <b>TOTAL</b>                                       | <b>1010</b>        | <b>100</b> |         | <b>656</b> | <b>100</b> |         |  |  |
| <b>Sous-total pétrole + prod. pétroliers</b>       | <b>526</b>         | <b>52</b>  |         | <b>342</b> | <b>51</b>  |         |  |  |

Tableau H2 *Energie distribuée (finale)*

| 1989  | Energie selon OFEN |            | Energie |            |            | Exergie |  |  |
|---|--------------------|------------|---------|------------|------------|---------|--|--|
|   | PJ                 | %          | em      | PJ         | %          |         |  |  |
| Combustibles                                    |                    |            |         |            |            |         |  |  |
| pétroliers                                      | 269                | 34         | 0,65    | 175        | 31         |         |  |  |
| gaz   | 65                 | 8          | 0,65    | 43         | 8          |         |  |  |
| charbon   | 14                 | 2          | 0,65    | 9          | 1          |         |  |  |
| bois  | 12                 | 2          | 0,65    | 8          | 1          |         |  |  |
| déchets   | 7                  | 1          | 0,65    | 4          | 1          |         |  |  |
| chaleur à distance                              | 11                 | 1          | 0,15    | 2          | 1          |         |  |  |
| Sous-total combustibles                         | <b>378</b>         | <b>49</b>  |         | <b>241</b> | <b>43</b>  |         |  |  |
| Carburants                                      |                    |            |         |            |            |         |  |  |
|   | <b>236</b>         | <b>30</b>  | 0,65    | <b>153</b> | <b>28</b>  |         |  |  |
| Electricité                                     |                    |            |         |            |            |         |  |  |
|   | <b>164</b>         | <b>21</b>  | 1,0     | <b>164</b> | <b>29</b>  |         |  |  |
| <b>TOTAL</b>                                    | <b>778</b>         | <b>100</b> |         | <b>558</b> | <b>100</b> |         |  |  |
| <b>Sous-total pétroliers + prod. pétroliers</b> | <b>505</b>         | <b>65</b>  |         | <b>328</b> | <b>58</b>  |         |  |  |

## H 4

| 1989                     |     | Ménages |     | Indus- |     | Artis. |     | Trans- |     | TOTAL |     |
|--------------------------|-----|---------|-----|--------|-----|--------|-----|--------|-----|-------|-----|
|                          |     | PJ      | %   | PJ     | %   | PJ     | %   | PJ     | %   | PJ    | %   |
|                          |     | 1       | 2   | 3      | 4   | 5      | 6   | 7      | 8   | 9     | 10  |
| Prod. pétr.(comb.+carb.) |     |         |     |        |     |        |     |        |     |       |     |
| Energie                  | 1.  | 149     | 63  | 45     | 30  | 79     | 52  | 232    | 96  | 505   | 65  |
| em                       | 2.  | 0,65    |     | 0,65   |     | 0,65   |     | 0,65   |     |       |     |
| Exergie                  | 3.  | 97      | 58  | 29     | 25  | 51     | 44  | 151    | 94  | 328   | 58  |
| Gaz                      |     |         |     |        |     |        |     |        |     |       |     |
| Energie                  | 4.  | 26      | 11  | 26     | 17  | 13     | 9   | -      | -   | 65    | 8   |
| em                       | 5.  | 0,65    |     | 0,65   |     | 0,65   |     |        |     |       |     |
| Exergie                  | 6.  | 17      | 10  | 17     | 15  | 9      | 8   | -      | -   | 43    | 8   |
| Charbon, bois, dechets,  |     |         |     |        |     |        |     |        |     |       |     |
| chal. à dist.            |     |         |     |        |     |        |     |        |     |       |     |
| Energie                  | 7.  | 14      | 6   | 24     | 16  | 6      | 4   | -      | -   | 44    | 6   |
| em *                     | 8.  | 0,49    |     | 0,61   |     | 0,26   |     |        |     |       |     |
| Exergie                  | 9.  | 7       | 4   | 15     | 13  | 1      | 1   | -      | -   | 23    | 5   |
| Electricité              |     |         |     |        |     |        |     |        |     |       |     |
| Energie                  | 10. | 46      | 20  | 55     | 37  | 54     | 35  | 9      | 4   | 164   | 21  |
| em                       | 11. | 1,0     |     | 1,0    |     | 1,0    |     | 1,0    |     |       |     |
| Exergie                  | 12. | 46      | 26  | 55     | 46  | 54     | 45  | 9      | 5   | 164   | 29  |
| Total                    |     |         |     |        |     |        |     |        |     |       |     |
| Energie                  | 13. | 235     | 100 | 150    | 100 | 152    | 100 | 241    | 100 | 778   | 100 |
| % de 778                 | 14. |         | 30  |        | 19  |        | 20  |        | 31  |       |     |
| Exergie                  | 15. | 167     | 100 | 116    | 100 | 115    | 100 | 160    | 100 | 558   | 100 |
| % de 558                 | 16. |         | 30  |        | 20  |        | 21  |        | 29  |       |     |

Tableau H3 Répartition de l'énergie distribuée

\* moyenne pondérée de em = 0,65 pour le charbon, le bois, et les déchets et 0,15 pour la chaleur à distance.

(Note: les pourcents sont calculés sur les chiffres plus précis, à 2 décimales.)

- (colonne 2) le rôle important des produits pétroliers dans l'économie énergétique des ménages (env. 60%)
- (colonne 4) la place de l'électricité dans les besoins de l'industrie, place qui passe de 37% dans la statistique à 46% dans le calcul exergétique
- (colonne 6) les produits pétroliers fournissent environ la moitié des besoins du secteur «artisanat, agriculture, service» (52% dans la statistique, 44% en energie) mais aussi la part voisine prise par l'électricité dans ce secteur (35% en énergie, 45% en energie).

#### c) Energie utile

Partant des valeurs estimées par l'OFEN quant à la répartition de l'énergie utile selon sa nature (chaleur, travail mécanique, inclusion dans les processus chimiques, éclairage) et selon ses consommateurs, nous

avons calculé cette répartition calculée en exergie (voir tableau J2, Annexe J). Pour ce qui concerne la chaleur, son niveau de température étant déterminant quant à sa valeur exergétique, nous l'avons répartie en 3 niveaux:

- haute température: 500 à 1000 °C, em = 0,5
- moyenne température: 200 à 400 °C, em = 0,3
- basse température: 50 à 120 °C, em = 0,1

Cette répartition n'a cependant pas de base statistique, qui fait défaut, mais résulte d'estimations.

Les figures H4 à H7 visent à mieux mettre en évidence les très grandes différences existant dans le volume et la répartition de l'énergie utile selon qu'on se borne au calcul usuel (statistiques de l'OFEN) ou qu'on adopte le calcul exergétique, seul véritablement correct, rappelons-le.

La figure H4 (p. 149 H 10) rappelle tout d'abord que

l'exergie utile n'est que le tiers environ de l'énergie utile usuelle. Le passage de l'énergie distribuée à l'énergie utile comporte donc des pertes très notablement plus élevées qu'on ne le croit: 72% au lieu de 44%. On y voit que la chaleur ne constitue pas les 3/4 de l'énergie utile, mais moins de 1/3: c'est le travail mécanique, qui reste inchangé en valeur absolue (104 PJ), dont la proportion du total est beaucoup plus grande: 2/3 et non 1/4.

La figure H5 (p. 150 H 11) fait ressortir que l'apport des combustibles à l'énergie utile n'est que de 24% et non de 62%. Celui des carburants, inchangé en valeurs absolues (52 PJ) puisqu'il est déjà calculé en travail mécanique, augmente fortement en part du total, passant de 12% à 33%. Le rôle de l'électricité apparaît aussi notablement plus élevé (43%) que la statistique usuelle ne l'estime (26%); il diminue cependant en valeurs absolues (de 115 PJ à 67 PJ) parce qu'une partie de l'électricité est employée à produire de la chaleur, tout spécialement de la chaleur à basse température dans les ménages.

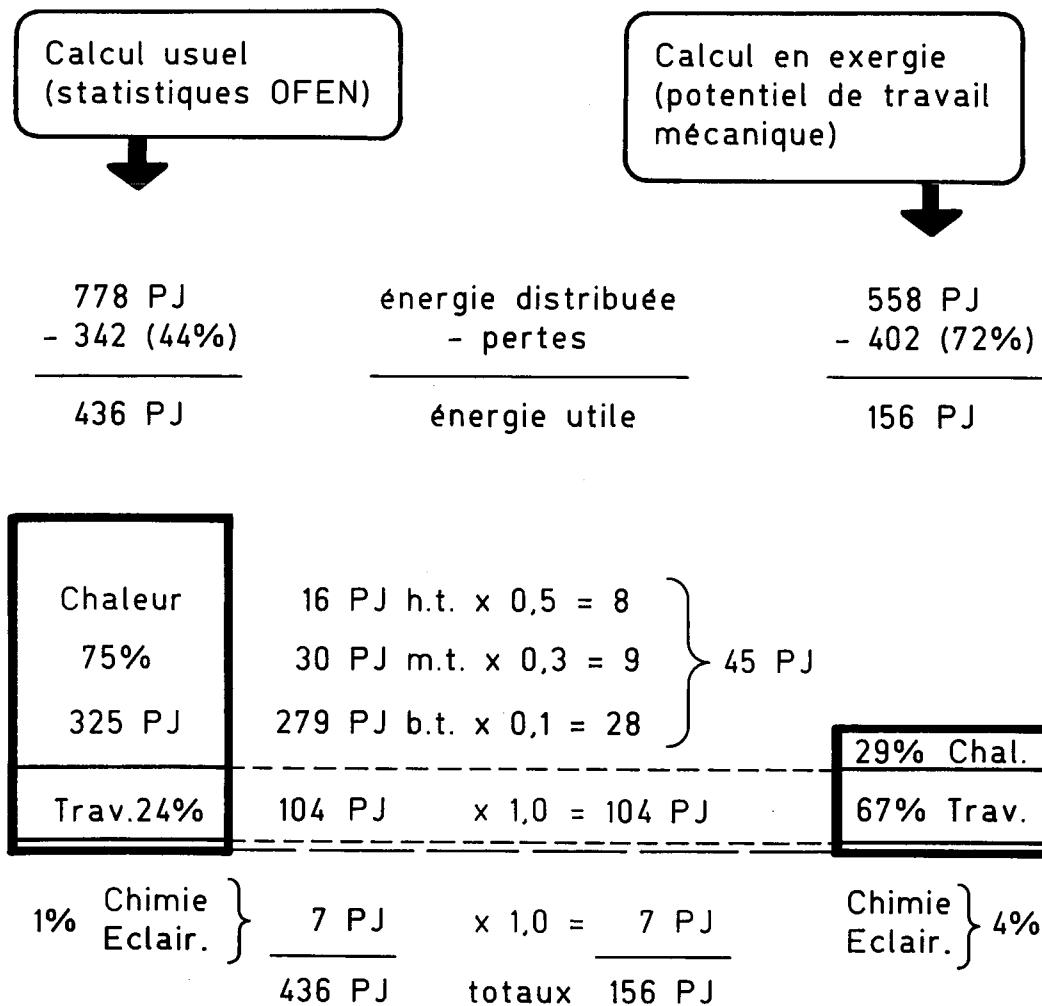
La figure H6 (p. 150 H 11) montre que la statistique usuelle surestime sensiblement le rôle des ménages

en tant que consommateurs d'énergie utile, ce rôle passant de 38% à 14%. Par contre, celui des transports est fortement sous-estimé, à 13% au lieu de 36%, donc de près d'un facteur 3.

Toutes ces observations prennent leur importance dès lors qu'il s'agit de localiser les pertes pour les combattre, ce qui fait l'objet de l'Annexe J.

Pour en terminer avec ces réflexions sur la répartition de l'énergie utile, la figure H7 (p. 151 H 12) met en évidence les rôles relatifs des sources d'énergie utile (combustibles, carburants, électricité) pour les diverses catégories de consommateurs. On voit ainsi que si la place de l'électricité passe de 26% dans le calcul usuel à 43% dans le calcul exergétique, cette place est particulièrement importante pour l'industrie et le secteur de l'artisanat-agriculture-services, atteignant 68% dans les deux cas. *Ces deux secteurs étant économiquement productifs, on mesure ainsi mieux les graves répercussions qu'une pénurie d'électricité pourrait avoir pour l'économie nationale (on mesure aussi les possibilités limitées qu'offre un effort de réduction de la consommation d'électricité des ménages).*

Fig. H4 Répartition de l'énergie utile selon sa forme



## H 6

Fig. H5 Répartition de l'énergie utile selon sa source

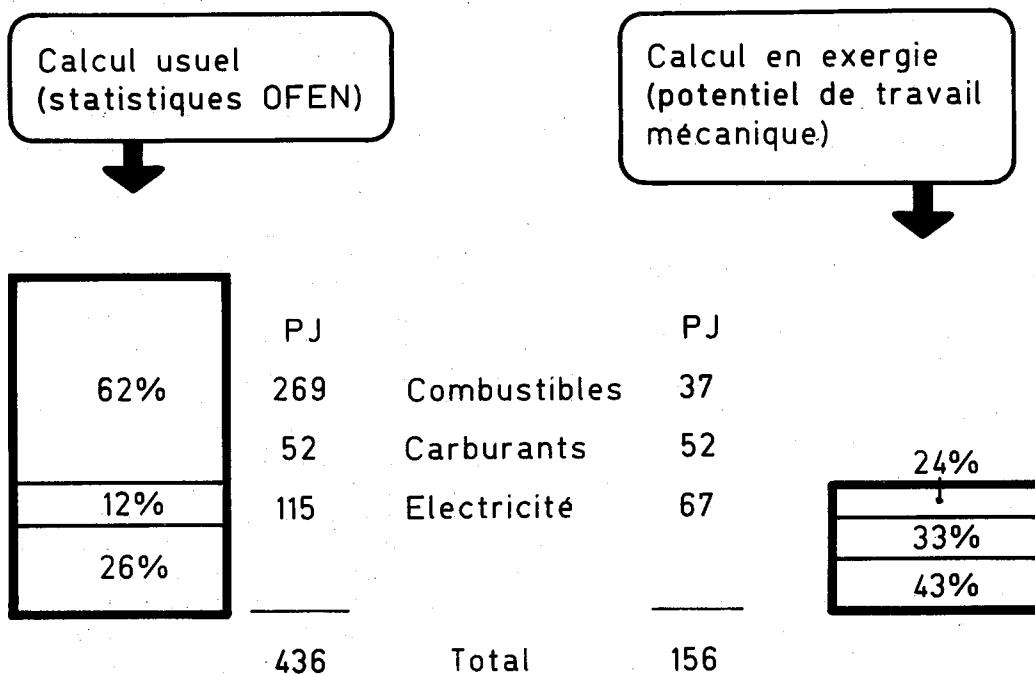


Fig. H6 Répartition de l'énergie utile selon les consommateurs

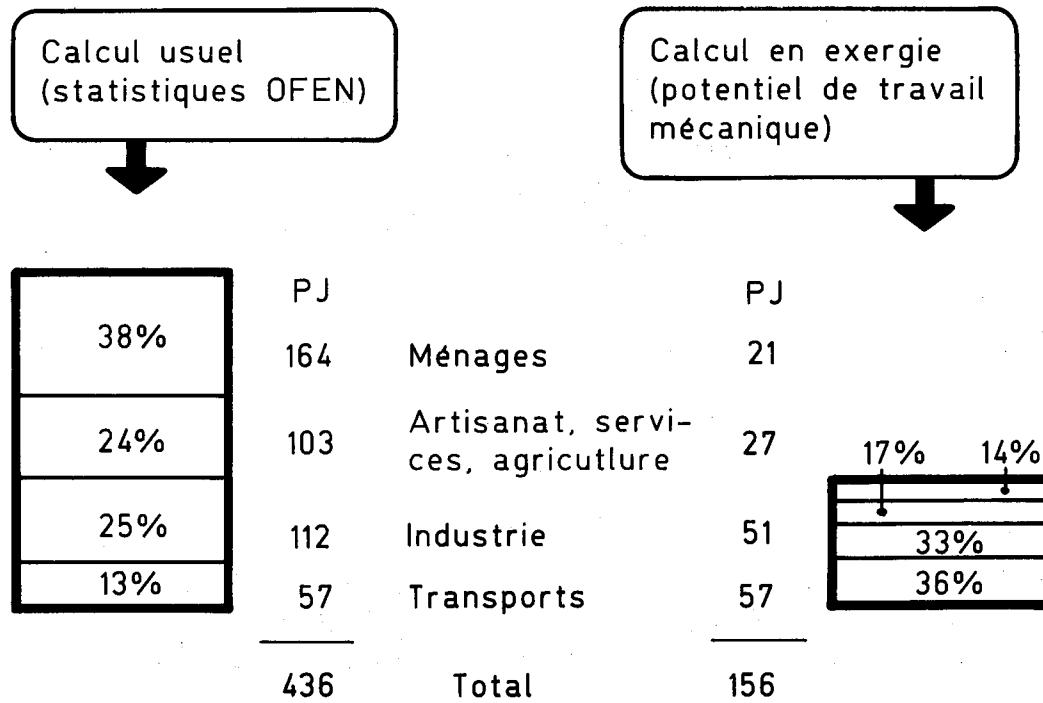
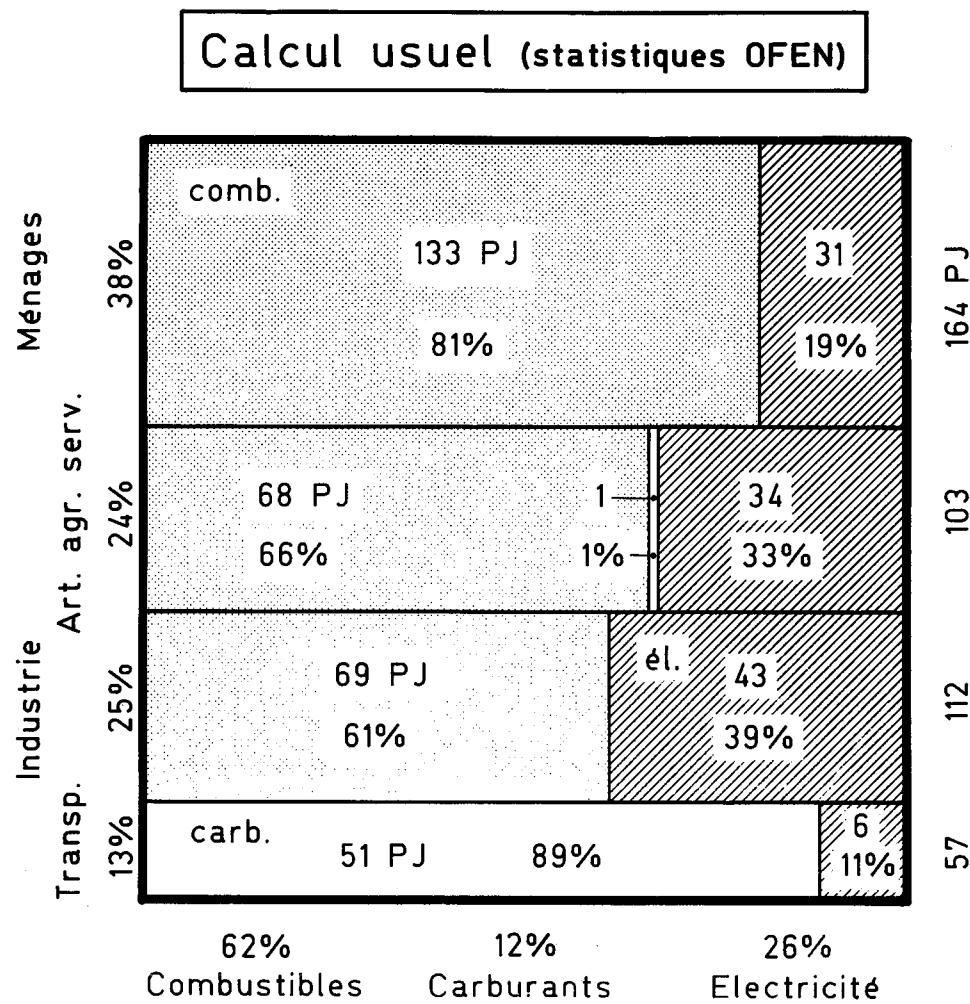
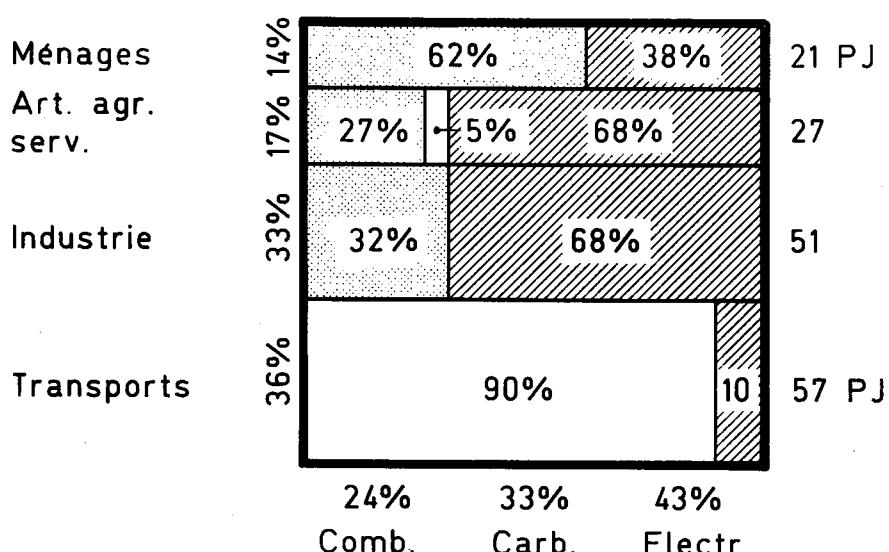


Fig. H7 Répartition de l'énergie utile

**Calcul en exergie (potentiel de travail mécanique)**

Les surfaces sont proportionnelles aux nombres de PJ

## ANNEXE J

# LOCALISATION ET ESTIMATION DES PERTES DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE SUISSE EN 1989

### § 1. Introduction

Ainsi qu'on l'a dit, et répété, le but d'une politique énergétique n'est pas la diminution de la consommation d'énergie en elle-même, mais la réduction des conséquences négatives de cette consommation, conséquences sur l'environnement, mais aussi dépendance de l'étranger, coût élevé de l'approvisionnement, etc.

En supposant, ce qui n'est évidemment pas toujours le cas, que l'énergie utile correspond à un besoin qui doit être satisfait, il importe de réduire à un minimum acceptable les pertes existant entre énergie primaire et énergie distribuée, puis entre cette dernière et énergie utile. Pour cela, il est essentiel de savoir où ces pertes sont localisées et quelles sont leurs ampleurs. Cela impose de connaître la répartition de l'énergie consommée aux trois niveaux: primaire, distribué et utile, répartition selon forme de l'énergie (combustibles, carburants, électricité) et selon catégorie de consommateur. La présente note annexe vise à une telle analyse. Quoique sujette à discussion sur de nombreux points, elle fournit cependant un éclairage utile sur cette question et elle devrait permettre de mieux apprécier où l'effort doit être porté.

Deux observations s'imposent avant d'entrer dans le détail des chiffres:

- a) L'énergie utile ne peut être considérée comme un besoin à satisfaire que si par ailleurs les efforts voulu-sont entrepris pour la limiter à ce qui est nécessaire. En d'autres termes, la lutte contre d'éventuels gaspillages d'énergie utile conserve tout son sens. C'est particulièrement le cas pour ce qui est du chauffage des locaux, grâce notamment à une isolation suffisante; mais il reste d'innombrables possibilités de détail, dont le total n'est certainement pas négligeable.
- b) L'utilisation du concept d'exergie donne seule une vue correcte des consommations, et par conséquent des pertes. C'est pourquoi, dans la présente note, les calculs sont faits en parallèle en énergie (il faut entendre par là, selon la méthode usuelle, qui conduit aux statistiques de l'OFEN) et en exergie. Dans ce dernier cas, nous avons fait usage des principes et définitions donnés à l'annexe G.

D'autres définitions pourraient être utilisées, par exemple en ce qui concerne l'énergie nucléaire (ou pour le cycle moteur choisi pour déterminer la valeur exergétique de la chaleur), mais la méthodologie resterait la même, et, pensons-nous, les conclusions subsisteraient sans changement, pour l'essentiel.

### § 2. Présentation générale

La figure J1 présente le bilan énergétique suisse de 1989, *en énergie et en exergie*, simplifié en groupant toutes les énergies dans les trois formes principales de l'énergie distribuée: combustibles (pétrole et produits pétroliers, gaz, charbon, bois, déchets, chaleur à distance), carburants et électricité.

Pour ce qui est du calcul usuel, les chiffres utilisés sont ceux établis par l'OFEN. La figure J1 fait ressortir que le passage de l'énergie primaire à l'énergie distribuée n'occasionne que des pertes limitées (env. 5%) pour les **combustibles et les carburants**; la diminution est beaucoup plus forte en ce qui concerne l'électricité (199 PJ sur 363, donc 55%). Pour les deux premiers (combustibles et carburants), ils restent comparables aux deux niveaux (primaire et distribué) pour leurs énergies potentielles de combustion, inchangées.

Par contre, pour l'**électricité** il s'agit, à raison de 98%, d'**hydraulique et de nucléaire**, les 2% restants correspondant à une production thermique.

Pour l'**hydraulique**, il est admis que 137 PJ d'énergie primaire permettent de produire 110 PJ d'électricité; le rendement moyen des installations est ainsi de 80%. La perte de 20% provient des imperfections des installations, en gros pour moitié de l'adduction de l'eau (pertes de charge) et pour moitié des machines (turbines, etc.).

Le calcul est tout à fait différent en ce qui concerne le **nucléaire** pour lequel il est admis dans la statistique que 235 PJ de combustible nucléaire (énergie primaire) ont assuré la production de 75,5 PJ d'électricité, donc avec un «rendement» de 33%. Ces 235 PJ sont en fait la chaleur délivrée par la fission dans les réacteurs (il ne s'agit donc pas à proprement parler du potentiel énergétique du combustible utilisé, ainsi que

cela est présenté dans la note annexe H, au § 2, définitions); cette valeur est néanmoins proche du potentiel énergétique maximal de ce combustible si l'on admet que cette chaleur est dégagée à une température voisine de la température de flamme des combustibles usuels, environ 2 200 K (soit près de 2 000 °C). Or la chaleur dégagée par la fission (qui peut être théoriquement encore plus élevée) doit être limitée à un niveau compatible avec la bonne tenue des éléments de combustible; elle n'est transmise à la vapeur qu'au voisinage de 300 à 350 °C. L'efficacité motrice «em» correspondante, qui détermine l'exergie, est alors d'environ 0,32, et non 0,70 comme c'est le cas pour une température de 2 200 K. Pour tenir compte de ce niveau effectif de la température (env. 325 °C), il faut alors considérer que l'énergie primaire du combustible nucléaire est réduite de plus de la moitié (0,32/0,70); elle ne vaut plus que 107 PJ. Le «rendement» s'élève dès lors à  $75,5/107 = 71\%$ ; il atteint même 75% si l'on admet que la chaleur n'est transmise qu'à 300 °C. Le terme de «rendement» correspond alors bien à une mesure des imperfections de l'installation (transferts de chaleur, pertes de charges, turbine, etc.).

**La valeur exergétique de l'énergie primaire utilisée à la production d'électricité** est ainsi la somme de l'énergie hydraulique (137 PJ) et de celle du combustible nucléaire (env. 107 PJ), dont à déduire 9 PJ d'excès d'exportation d'électricité; au total 235 PJ.

La perte résultant de la transformation de l'énergie primaire en électricité distribuée est ainsi ramenée, dans le calcul exergétique, de 199 PJ à 71 PJ (soit 30% de 235 PJ), valeur certainement plus correcte.

La figure J1 fait ressortir d'autre part que le passage de l'énergie distribuée à l'énergie utile s'accompagne de pertes importantes: 342 PJ sur 778, soit 44%. Cette diminution est tout spécialement élevée pour les carburants, qui de 236 PJ ne fournissent que 52 PJ de travail mécanique, avec un «rendement» moyen de 22%. C'est essentiellement l'effet du faible rendement des moteurs à explosion, de nouveau en conséquence principalement du cycle moteur thermodynamique, dont on constate que son influence ne se fait pas sentir au même endroit de la chaîne énergétique que pour le combustible nucléaire; ce rendement est d'autant plus faible que les moteurs à explosion ne sont que peu utilisés dans des conditions optimales de fonctionnement.

La figure J1 reprend les mêmes données dans un calcul exergétique. On y voit tout d'abord que le total en énergie primaire diminue de 1010 PJ à 656 PJ, par suite d'un autre mode d'évaluation du potentiel énergétique des trois composants: combustibles, carburants et électricité. Ce potentiel des combustibles et carburants est pris ici à la valeur correspondant à la température de 1 500 °C (mentionnée à l'Annexe H, § 2). Néanmoins, la diminution constatée en passant de 656 PJ à 558 PJ d'énergie distribuée a principalement la même cause que dans le calcul usuel: le «rendement» limité de la production d'électricité nucléaire.

Mais c'est avec le passage à l'énergie utile que le calcul exergétique se différencie le plus du calcul usuel. Les pertes sont plus élevées (402 PJ contre 3 342),

surtout en valeurs relatives: 402 PJ sur 558, soit 72% (et non plus 44%).

Ce résultat est dû à la prise en compte du niveau de température dans le calcul exergétique, niveau relativement bas pour toute la chaleur de chauffage de locaux (50 à 120 °C). La chaleur utile n'est plus de 269 PJ comme dans le calcul usuel, mais seulement de 37 PJ.

Il faut se convaincre que cette vue exergétique est seule correcte; la chaleur utile n'a véritablement qu'une aussi faible valeur, comme nous nous sommes efforcés de le démontrer dans l'Annexe G.

Par l'examen de cette figure J1, on se rend mieux compte du très grand volume des pertes en énergie du système énergétique national: 656 – 156 = 500 PJ ou 76%!

### § 3. Essai de détermination de la répartition détaillée des pertes

La répartition de l'énergie **distribuée** (finale) et de l'énergie utile, entre les consommateurs et selon la forme de l'énergie distribuée, a été établie par l'OFEN. On peut en déduire la répartition correspondante de l'énergie **primaire**. Les chiffres obtenus font l'objet des tableaux J2, J3 et J4.

En vue du calcul en énergie, nous avons estimé une répartition, variable selon les consommateurs, de la chaleur utile en 3 niveaux:

- basse température 50 à 120 °C
- moyenne température 200 à 400 °C
- haute température 500 à 1000 °C

Cette répartition apparaît sur ces tableaux J2 à J4.

A partir de cette répartition, il est possible de calculer la valeur en énergie des diverses parts d'énergie; les résultats de ce calcul figurent également sur les trois tableaux J2 à J4. On y retrouve les divers totaux mentionnés ailleurs, notamment sur la figure J1, mais également dans l'Annexe H (bilan énergétique suisse).

Par différence entre ces tableaux, on trouve immédiatement les pertes résultant du passage de l'énergie primaire à celle distribuée, puis à l'énergie utile; cela pour chacune des 3 formes d'énergie distribuée (combustibles, carburants, électricité), pour chaque catégorie de consommateurs (ménages, industrie, etc.) et pour chaque forme d'énergie utile: chaleur (celle-ci subdivisée en 3 niveaux de température), travail mécanique, chimie et éclairage. L'ensemble de ces pertes partielles est groupé au tableau J5.

On y voit que les principales pertes du système énergétique suisse (plus de 20 PJ chacune) résultent des transformations suivantes, en énergie (calcul usuel):

|   |        |
|---|--------|
| – carburants distribués aux transports pour travail mécanique                       | 181 PJ |
| – combustibles distribués aux ménages pour chaleur à basse température              | 56 PJ  |
| – énergie primaire en électricité pour les ménages pour chaleur à basse température | 40 PJ  |

## J 3

- énergie primaire en électricité à l'industrie pour du travail mécanique 39 PJ
- combustibles distribués au secteur artisanat, agriculture, services, pour chaleur à basse température 25 PJ
- idem à l'artisanat, etc. pour chaleur à basse température 25 PJ
- idem pour travail mécanique 23 PJ

Ces 7 sources de pertes totalisent 389 PJ sur un total des pertes de 574, soit le 68%. Trois d'entre elles sont relatives à la transformation de l'énergie primaire en électricité, qui, pour l'ensemble des emplois de l'électricité, totalisent 199 PJ (35% du total des pertes). Quatre de ces 7 sources de pertes concernent la mise à disposition de chaleur à basse température, et totalisent 146 PJ (25% du total des pertes).

Cependant, pour la localisation des pertes et leur esti-

mation, l'approche exergétique donne une vue plus correcte; les chiffres correspondants figurent également au tableau J5. Les principales pertes (plus de 15 PJ chacune) résultent alors des transformations suivantes, en exergie:

- combustibles distribués aux ménages pour chaleur utile à basse température 108 PJ
- carburants distribués aux transports pour travail mécanique 99 PJ
- combustibles distribués au secteur artisanat, agriculture et services pour chaleur à basse température 49 PJ
- énergie primaire transformée en électricité, aux ménages pour chaleur à basse température 31 PJ
- combustibles distribués à l'industrie pour chaleur à basse température 27 PJ

Fig. J1 Répartition des énergies primaires, distribuées et utiles, selon forme de l'énergie distribuée (combustibles, carburants, électricité) et répartition des pertes

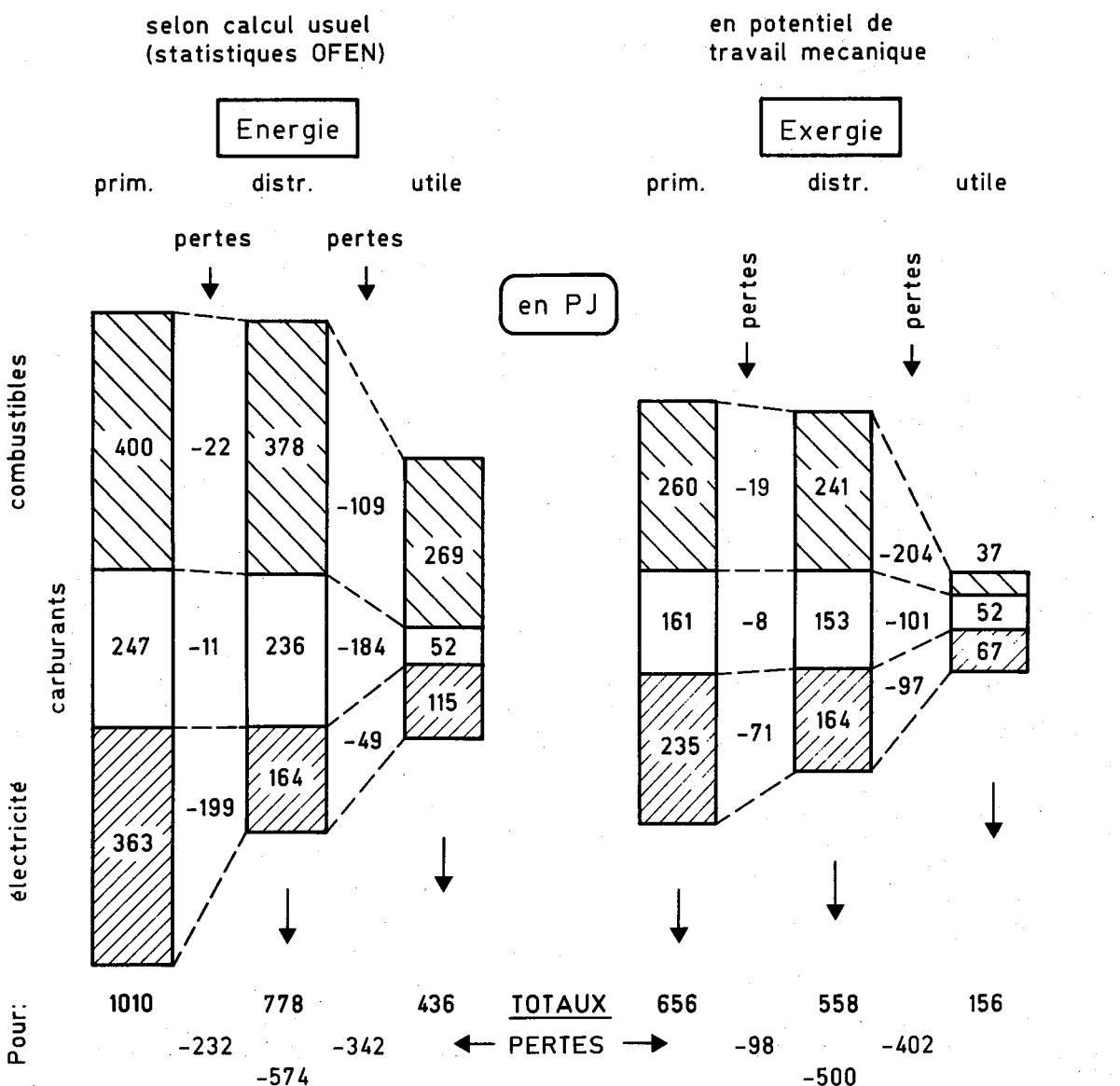


Tableau J2 Répartition de l'énergie PRIMAIRE et de l'exergie primaire, selon forme de l'énergie distribuée et consommateurs, en PJ (Suisse 1989)

\* moyenne pondérée entre hydraulique (0,8) et nucléaire (0,32/0,7) voir § 2

| Forme de l'énergie distribuée | Consommateurs d'énergie utile | Ménages            |           |            | Artisanat. Agric. Services |              |            | Industrie    |          |                    | Transports  |            |            | Total %      |         |                  |              |            |             |            |             |            |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------|------------|----------------------------|--------------|------------|--------------|----------|--------------------|-------------|------------|------------|--------------|---------|------------------|--------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
|                               |                               | Chaleur 40 - 100°C | 200 - 400 | Trav. méc. | Chaleur 40 - 100°C         | 200 - 400    | 500 - 1000 | Trav. méc.   | Ecl.     | Chaleur 40 - 100°C | 200 - 400   | 500 - 1000 | Trav. méc. | Chim.        | Ecl.    | Chal. 40 - 100°C | Trav. méc.   | Ecl.       |             |            |             |            |
| Combustibles énergie exergie  | em 0,65                       | 200<br>130         |           |            | 95%<br>95<br>82            | 5%<br>5<br>3 |            |              |          | 50<br>32           | 30<br>20    | 20<br>13   |            |              |         |                  |              |            | 400<br>260  | 40<br>40   |             |            |
| Carburants énergie exergie    | 0,65                          |                    |           |            |                            |              |            | 5<br>3       |          |                    |             |            |            |              |         |                  |              | 242<br>158 | 24<br>24    |            |             |            |
| Électricité énergie exergie   | * 0,65                        | 73<br>48           | 4<br>3    | 13<br>8    | 13<br>8                    | 46<br>30     | 5<br>3     | 3<br>2       | 42<br>27 | 24<br>16           | 19<br>12    | 10<br>7    | 3<br>2     | 71<br>46     | 12<br>8 | 5<br>3           | 1<br>-       | 19<br>12   | 0<br>-      | 363<br>235 | 36<br>36    |            |
| Total énergie exergie         |                               | 303/1010=30%       |           |            | 197/656=30%                |              |            | 225/1010=22% |          |                    | 146/656=22% |            |            | 220/1010=22% |         |                  | 262/1010=26% |            | 170/656=26% |            | 1010<br>656 | 100<br>100 |

Tableau J3 Répartition de l'énergie DISTRIBUÉE et de l'exergie distribuée, selon forme et consommateurs, en PJ (Suisse 1989)

\* moyenne pondérée entre 0,65 pour comb. pétroliers, gaz, charbon, bois, déchets et 0,15 pour chal. à distance

Energie: valeurs de l'OFEN (sauf répartition de la chaleur selon température, estimée par l'auteur)

| 1989                                   |          | Ménages                |                  |                   | Artisanat. Agric. Services  |                          |                  | Industrie            |                    |                             | Transports                  |                             |                      | TOTAL %           |                   |                   |                   |                      |                      |                    |
|--|----------|------------------------|------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
|  |          | Chaleur 40 - 100°C     | 200 - 400        | Trav. méc.        | Chaleur 40 - 100°C          | 200 - 400                | 500 - 1000       | Trav. méc.           | Ecl.               | Chaleur 40 - 100°C          | 200 - 400                   | 500 - 1000                  | Trav. méc.           | Chal. 40 - 100°C  | Trav. méc.        | Ecl.              |                   |                      |                      |                    |
| Combustibles énergie exergie           | *em 0,65 | 189,0<br>120,8<br>0,64 |                  |                   | 95%<br>89,2<br>55,7<br>0,62 | 5%<br>4,7<br>3,1<br>0,65 |                  |                      |                    | 50%<br>47,6<br>29,9<br>0,63 | 30%<br>28,6<br>18,6<br>0,65 | 20%<br>19,1<br>12,4<br>0,65 |                      |                   |                   |                   |                   | 378,1<br>240,5<br>43 |                      |                    |
| Carburants énergie exergie             | em 0,65  |                        |                  |                   |                             |                          |                  | 4,4<br>2,9           |                    |                             |                             |                             |                      |                   |                   |                   | 231,6<br>150,5    | 236,0<br>153,4       | 28                   |                    |
| Électricité énergie exergie            | em 1,0   | 95%<br>33,1<br>33,1    | 5%<br>1,7<br>1,7 | 5,8<br>5,8<br>5,8 | 85%<br>20,6<br>20,6         | 10%<br>2,4<br>2,4        | 5%<br>1,2<br>1,2 | 16,8<br>16,8<br>16,8 | 10,8<br>8,8<br>8,8 | 60%<br>8,8<br>8,8           | 30%<br>4,4<br>4,4           | 10%<br>1,5<br>1,5           | 32,0<br>32,0<br>32,0 | 5,5<br>5,5<br>5,5 | 2,5<br>2,5<br>2,5 | 0,3<br>0,3<br>0,3 | 8,4<br>8,4<br>8,4 | 0,2<br>0,2<br>0,2    | 163,8<br>163,8<br>29 |                    |
| Total énergie exergie dont électricité |          | 235,3/777,9=30%        |                  |                   | 167,2/557,7=30%             |                          |                  | 152,1/777,9=20%      |                    |                             | 148,9/777,9=19%             |                             |                      | 240,5/777,9=31%   |                   | 159,5/557,7=29%   |                   | 777,9/557,7=100%     |                      | 100<br>ex/en<br>72 |

Tableau J4 Répartition de l'énergie UTILE et de l'exergie utile, selon forme de l'énergie distribuée et consommateurs, en PJ (Suisse 1989)

Energie: valeurs de l'OFEN (sauf répartition de la chaleur selon température, estimée par l'auteur)

| 1989                                   | PJ | Ménages            |                  |                   | Artisanat. Agric. Services |                   |                  | Industrie           |      |                    | Transports         |                    |                     | TOTAL             |                 |                  |              |                |              |   |
|--|----|--------------------|------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|------------------|---------------------|------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-----------------|------------------|--------------|----------------|--------------|---|
|  |    | Chaleur 50 - 120°C | 200 - 400        | Trav. méc.        | Chaleur 50 - 120°C         | 200 - 400         | 500 - 1000       | Trav. méc.          | Ecl. | Chaleur 50 - 120°C | 200 - 400          | 500 - 1000         | Trav. méc.          | Chim.             | Ecl.            | Chal. 50 - 120°C | Trav. méc.   | Ecl.           |              |   |
| Combustibles énergie exergie           | em | 0,1                | 0,3              | 1,0               | 1,0                        | 0,1               | 0,3              | 0,5                 | 1,0  | 1,0                | 0,1                | 0,3                | 0,5                 | 1,0               | 1,0             | 0,1              | 1,0          | 1,0            | PJ           | % |
| Carburants énergie exergie             |    | 132,7<br>13,3      |                  |                   | 95%<br>64,6<br>6,5         | 5%<br>3,4<br>1,0  |                  |                     |      | 50%<br>34,2<br>3,4 | 30%<br>20,5<br>6,2 | 20%<br>13,7<br>6,9 |                     |                   |                 |                  |              | 269,1<br>37,1  | 62<br>24     |   |
| Electricité énergie exergie            |    |                    |                  |                   |                            |                   |                  | 1,3<br>1,3          |      |                    |                    |                    |                     |                   |                 |                  | 51,0<br>51,0 | 52,3<br>52,3   | 12<br>33     |   |
| Total énergie exergie dont électricité |    | 95%<br>24,8<br>2,5 | 5%<br>1,3<br>0,4 | 4,6<br>4,6<br>0,6 | 85%<br>15,4<br>1,5         | 10%<br>1,8<br>0,5 | 5%<br>0,9<br>0,5 | 14,9<br>14,9<br>1,1 | 1,1  | 60%<br>6,8<br>0,7  | 30%<br>3,4<br>1,0  | 10%<br>1,1<br>0,6  | 26,9<br>26,9<br>5,0 | 5,0<br>5,0<br>0,2 | 0,2<br>0,4<br>0 | 5,9<br>5,9<br>0  | 0<br>0<br>0  | 115,1<br>66,9  | 26<br>43     |   |
|  |    | 164,0/436,5=38%    |                  |                   | 21,4/156,5=14%             |                   |                  | 103,4/436,5=24%     |      |                    | 111,8/436,5=25%    |                    |                     | 57,3/436,5=13%    |                 | 436,5/156,5=100% |              | 436,5<br>156,5 | 100<br>ex/en |   |
|  |    | 21,4/156,5=14%     |                  |                   | 27,3/156,5=17%             |                   |                  | 50,9/156,5=33%      |      |                    | 34,4/50,9=68%      |                    |                     | 56,9/156,5=36%    |                 | 5,9/56,9=10%     |              |                |              |   |
|  |    | 8,1/21,4=38%       |                  |                   | 18,5/27,3=68%              |                   |                  | 34,4/50,9=68%       |      |                    | 5,9/56,9=10%       |                    |                     | 5,9/56,9=10%      |                 | 436,5/156,5=100% |              |                |              |   |

## J 5

| Forme de l'én. distr. | P-D: én. prim.<br>- én. distribuée<br>D-U: én. distr.<br>- én. utile | Ménages                  |                      |        | Artisanat. Agric. Services |                                |        | Industrie                |                                |            | Transports             |               |           | Totaux     |            |            |            |          |
|-----------------------|--|--------------------------|----------------------|--------|----------------------------|--------------------------------|--------|--------------------------|--------------------------------|------------|------------------------|---------------|-----------|------------|------------|------------|------------|----------|
|                       |  | Chaleur<br>40 -<br>100°C | Trav.<br>méc.<br>400 | Ecl.   | Chaleur<br>40 -<br>100°C   | Trav.<br>méc.<br>500 -<br>1000 | Ecl.   | Chaleur<br>40 -<br>100°C | Trav.<br>méc.<br>400 -<br>1000 | Ecl.       | Chal.<br>40 -<br>100°C | Trav.<br>méc. | Ecl.      | PJ         | %          |            |            |          |
| Combust.              | P - D énergie<br>exergie   | 11<br>9                  |                      |        | 6<br>6                     | -                              |        | 2<br>2                   | 2<br>1                         | 1          |                        |               |           | 22<br>19   | 9<br>19    |            |            |          |
|                       | D - U énergie<br>exergie   | 56<br>108                |                      |        | 25<br>49                   | 1<br>2                         |        | 14<br>27                 | 8<br>13.                       | 5<br>5     |                        |               |           | 109<br>204 | 32<br>51   |            |            |          |
| Carburant             | P - D énergie<br>exergie   |                          |                      |        |                            | 1<br>-                         |        |                          |                                |            |                        |               | 10<br>8   | 5<br>8     |            |            |            |          |
|                       | D - U énergie<br>exergie   |                          |                      |        |                            | 3<br>2                         |        |                          |                                |            |                        |               | 181<br>99 | 54<br>25   |            |            |            |          |
| Électricité           | P - D énergie<br>exergie   | 40<br>15                 | 2<br>1               | 7<br>2 | 7<br>2                     | 25<br>9                        | 3<br>1 | 2<br>1                   | 23<br>8                        | 13<br>5    | 10<br>3                | 6<br>2        | 2<br>1    | 39<br>14   | 5<br>2     | 2<br>-     | 199<br>71  | 86<br>73 |
|                       | D - U énergie<br>exergie   | 8<br>31                  | 1<br>1               | 1<br>1 | 5<br>5                     | 5<br>19                        | 1<br>2 | 1<br>1                   | 4<br>4                         | 10<br>10   | 6<br>8                 | 2<br>4        | 1<br>1    | 5<br>2     | 1<br>-     | 2<br>2     | 49<br>97   | 14<br>24 |
| Total                 | P - D énergie<br>exergie   | 67<br>29                 | 29%<br>29%           |        | 73<br>30                   | 31%<br>33%                     |        | 70<br>26                 |                                | 30%<br>30% |                        |               |           | 22<br>13   | 10%<br>8%  | 232<br>98  | 100<br>100 |          |
|                       | D - U énergie<br>exergie   | 71<br>146                | 21%<br>36%           |        | 49<br>89                   | 14%<br>22%                     |        | 37<br>65                 |                                | 11%<br>16% |                        |               |           | 184<br>102 | 54%<br>26% | 342<br>402 | 100<br>100 |          |
|                       | P - U énergie<br>exergie   | 138<br>175               | 24%<br>35%           |        | 122<br>119                 | 21%<br>24%                     |        | 108<br>91                |                                | 19%<br>18% |                        |               |           | 206<br>115 | 36%<br>23% | 574<br>500 | 57<br>85   |          |

Tableau J5 Répartition des pertes entre énergies primaires, distribuées et utiles selon forme distribuée, selon consommateurs, et selon forme utile, en PJ (Suisse 1989)

p.m. Energie primaire totale: 1010 PJ = én. utile totale 436 PJ + pertes totales 574 PJ (ci-dessus)  
Energie primaire totale: 656 PJ = ex. utile totale 156 PJ + pertes totales 500 PJ (ci-dessus)

Ces 5 sources de perte d'exergie totalisent 314 PJ sur des pertes totales de 500 PJ, donc 63%. Quatre d'entre elles, totalisant 215 PJ (43% du total des pertes) concernent la mise à disposition de chaleur à basse température.

Il est utile de relever que les principales sources de pertes du système énergétique suisse sont donc, selon ce tableau, relatives à

a) la fourniture de chaleur à basse température à tous consommateurs: 205 PJ perdus en énergie (calcul usuel) à partir des énergies primaires, donc 20% de l'énergie primaire totale consommée, pour disposer de 309 PJ de cette chaleur utile (total chaleur utile 50 à 120 °C, tableau J4). Mais nous devons souligner ici, une fois de plus, que seul le calcul exergétique donne une vue correcte, tenant notamment compte du niveau des températures en jeu. *En exergie, le total des pertes, pour la même fourniture de chaleur utile à basse température, est, selon ce tableau J5, de 284 PJ, soit 43% de la totalité de l'énergie primaire consommée en Suisse, et cela pour disposer seulement de 28 PJ d'exergie sous forme de chaleur utile à basse température, soit 18% de l'énergie utile (156 PJ).*

b) la fourniture de travail mécanique au secteur des transports, qui occasionne des pertes totales, en énergie (calcul usuel), de 205 PJ, pour obtenir 57 PJ de travail utile. En **exergie**, le travail utile est inchangé, à 57 PJ (par définition de l'exergie), et son obtention entraîne des pertes totales de 114 PJ (23% du total des pertes).

c) la transformation d'énergie primaire en énergie utile entraîne, selon la forme distribuée, des pertes totales qui apparaissent à la colonne de droite du tableau J5 et sont récapitulées ci-après, en **énergie** (calcul usuel) ou **exergie**:

|                | énergie primaire | pertes | énergie utile |
|----------------|------------------|--------|---------------|
| - combustibles |                  |        |               |
| énergie        | 400              | -      | 131           |
| exergie        | 260              | -      | 223           |
| - carburants   |                  |        |               |
| énergie        | 247              | -      | 195           |
| exergie        | 161              | -      | 109           |
| - électricité  |                  |        |               |
| énergie        | 363              | -      | 248           |
| exergie        | 235              | -      | 168           |

#### § 4. Diminution des pertes

L'importance des pertes, notamment dans le calcul exergétique (500 PJ sur 656) ne peut laisser indifférent, et l'on se demande naturellement s'il est possible de les réduire notablement.

Les réflexions qui suivent sont soumises aux prémisses suivantes:

- il ne s'agit que de la consommation suisse en 1989 et l'on ne se préoccupe donc pas ici de la manière de faire face à une augmentation éventuelle (croissance économique, augmentation de la population)
- l'énergie utile consommée est considérée comme étant un besoin qui doit être satisfait, même si l'on peut penser que des économies y sont possibles, et sans tenir compte des distorsions de calcul mentionnées par ailleurs (p. ex. énergie dépensée au transport des combustibles, incluse dans le travail mécanique utile).

C'est l'énorme perte d'énergie liée à la fourniture de chaleur utile à basse température qui doit, la première, retenir notre attention: 284 PJ, soit 43% de la totalité de l'exergie primaire consommée en Suisse, comme déjà relevé ci-dessus. Cette perte provient principalement de la transformation de l'énergie distribuée, en chaleur utile à basse température (242 PJ sur les 284 PJ perdus) et elle se répartit entre (tableau J5)

- combustibles: 184 PJ (76%)
- électricité: 48 PJ (24%).

Pour ce qui concerne les combustibles, il s'agit surtout de la non-mise à profit du saut de température entre le foyer ( $1000 - 1200^{\circ}\text{C}$ ) et le circuit de chauffage ( $50 \text{ à } 80^{\circ}\text{C}$ ). Ainsi que nous l'avons relevé dans l'Annexe G, § 3, les gaz de combustion à haute température pourraient, quant au principe, être utilisés dans une centrale thermique produisant de l'électricité (p. ex. turbine à gaz entraînant une génératrice) et ne servir au chauffage qu'après refroidissement (p. ex. turbine

à vapeur à contre-pression, condenseur à  $70^{\circ}\text{C}$  à  $120^{\circ}\text{C}$ ; l'électricité obtenue peut à son tour être mise à profit pour actionner une pompe à chaleur. La figure J6 montre les schémas comparatifs du chauffage usuel et du système «chaleur-force» évoqué ci-dessus (les chiffres ne sont qu'indicatifs des ordres de grandeurs possibles en admettant que la pompe à chaleur a un coefficient de performance de 3 à 4). On y voit qu'à combustible consommé égal, le système «chaleur-force» permet d'obtenir une chaleur de chauffage double.

Note: S'agissant de chauffage, donc par temps froid, la température extérieure est prise ici à  $5^{\circ}\text{C}$ . Les différentes exergies sont donc calculées avec  $T_1 = 5^{\circ}\text{C} = 278\text{ K}$ . On remarque que la valeur exergétique des 100 J de combustible passe de 66 J pour  $T_2 = 1500^{\circ}\text{C}$  et  $T_1 = 15^{\circ}\text{C}$  à 66 J. La valeur d'un combustible en énergie primaire dépend donc de la température  $T_1$  considérée, ce qui peut surprendre à première vue; mais c'est bien la réalité physique, et économique: on tire plus d'énergie mécanique d'un combustible si la température extérieure est basse (ce dont le calcul usuel ne tient pas compte).

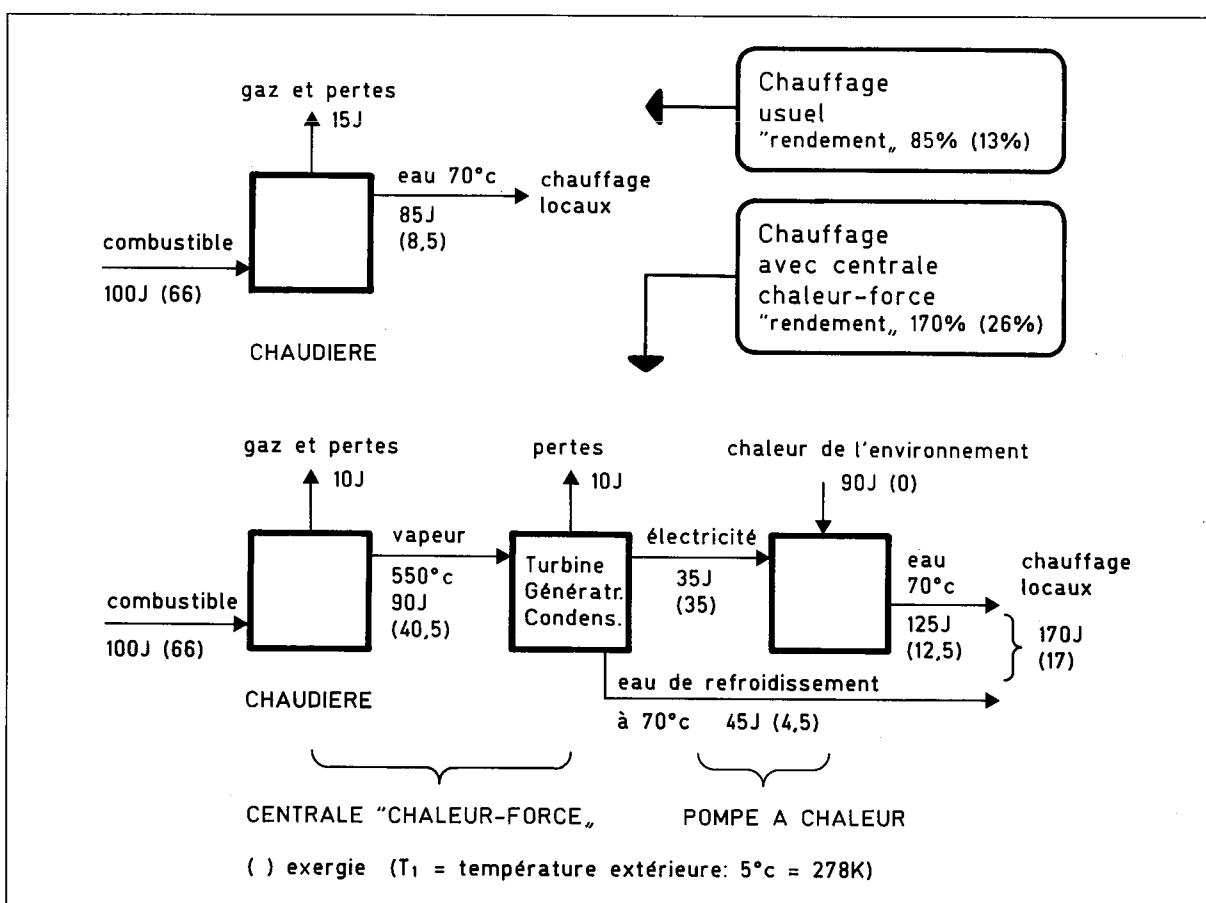


Fig. J6 Schémas simplifiés comparatifs: chauffage usuel ou avec centrale «chaleur-force»

Il va de soi qu'une telle installation ne peut exister dans chaque immeuble, mais doit être centralisée, par quartier ou agglomération, avec un réseau de chauffage à distance. Il en résulte des investissements supplémentaires, mais aussi une économie d'échelle, la possibilité d'installations plus performantes et un meilleur contrôle (p. ex. dispositifs de protection de l'environnement).

On remarque sur le schéma J6 que le rendement exergétique reste néanmoins faible (26%); il n'est pas fait usage du saut de température de  $1500^{\circ}\text{C}$  (température utilisée pour le calcul du potentiel du combustible) à  $550^{\circ}\text{C}$  (température de la vapeur) qui à lui seul vaut 22 J en exergie (env. = 0,34). On voit ici l'avantage qu'il y aurait à utiliser une turbine à gaz acceptant le gaz à plus haute température ( $800 \text{ à } 1000^{\circ}\text{C}$ ).

## J 7

On remarque aussi la faible performance admise pour la pompe à chaleur ( $10,6/35 = 30\%$ ); là également des améliorations devraient pouvoir être obtenues. Quoi qu'il en soit, une augmentation d'un facteur 2 est déjà un progrès substantiel.

En supposant que de telles dispositions puissent être étendues à l'ensemble de la Suisse jusqu'à concerter la moitié de la chaleur utile à basse température, c'est la moitié de l'énergie primaire correspondante qui serait économisée, donc  $350/2 = 175$  PJ de combustibles et  $139/2 = 70$  PJ destinés à la production d'électricité (hydraulique et combustible nucléaire), soit 245 PJ sur 1010 (24%).

La principale autre cause de pertes est le faible rendement des moteurs à explosion. Il paraît clair qu'à énergie utile égale, donc à transport égal, on ne peut guère envisager d'amélioration prochaine et notable de la situation (quoique la consommation spécifique de ces moteurs, p. ex. litres/100 km, va sans doute encore diminuer). Un parc significatif de voitures solaires n'est pas en vue. Quant aux voitures électriques, leurs coûts et leurs performances limitées n'en font pas encore une solution de rechange (à noter aussi que si leur généralisation réduirait les besoins en carburants, elle augmenterait ceux en électricité). On peut souhaiter convaincre les usagers de recourir

davantage aux transports publics, notamment en zone urbaine (il faudrait alors que ces transports soient plus fréquents, plus rapides, plus confortables et avec un réseau plus dense en périphérie), mais il s'agirait alors de diminuer l'énergie utile, ce qui n'est pas ici notre propos.

Relevons pour terminer que la production d'électricité à partir de la chaleur (centrales thermiques et nucléaires) pourrait être augmentée, à énergie primaire égale, si les températures pouvaient être augmentées. Cela paraît possible pour les centrales nucléaires (où, de plus, les températures de vapeur sont peu élevées). Cela suppose la poursuite du développement en cours de réacteurs à haute température (p. ex. 800 à 1000 °C) conduisant à des cycles thermodynamiques plus performants.

En conclusion, un potentiel important d'économie d'énergie primaire paraît exister en ce qui concerne le chauffage des locaux. Nous pensons que l'on sera conduit en Suisse, au cours des prochaines décennies, à prévoir des centrales électriques thermiques (utilisant probablement du gaz); on devrait les prévoir en parallèle avec le développement de réseaux de chauffage à distance et, semble-t-il, des pompes à chaleur.



—

Editions Fédération romande pour l'énergie (FRE)  
Case postale 119, 1000 Lausanne 9  
Tél. 021 / 312 90 66

