

NOUVELLE ÉDITION

# L'ÉNERGIE dans le monde

BILAN ET PERSPECTIVES



JEAN-LOUIS BOBIN, HERVÉ NIFENECKER, CLAUDE STÉPHAN

**SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHYSIQUE**



Extrait de la publication

Société française de physique

# L'énergie dans le monde : bilan et perspectives

Deuxième édition

Jean-Louis Bobin  
Hervé Nifenecker  
Claude Stéphan



17, avenue du Hoggar  
Parc d'Activité de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

ISBN : 978-2-7598-0025-4

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2007

## Remerciements

Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés à réaliser ce document en nous faisant bénéficier de leurs remarques, de leurs écrits ou en nous fournissant des informations chiffrées. Nous pensons en particulier à :

Mmes Valérie Blanchot-Courtois, ancienne directrice de recherches à Gaz de France,

Élisabeth Huffer, commission énergie de la Société française de physique,

MM. Pierre Bacher, ancien directeur délégué d'EDF,

Roger Balian, ancien président de la Société française de physique, qui a bien voulu écrire la préface,

Bernard Cagnac, ancien président des éditions EDP Sciences,

Sylvain David, Institut de physique nucléaire d'Orsay,

Jean Jouzel, directeur de recherches au CEA, directeur de l'Institut Pierre Simon Laplace,

Jean Lahérrère, consultant, ancien ingénieur à la société Total,

Jean-Marie Loiseaux, professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble,

Jean Marie Martin, directeur de recherches émérite au CNRS,

Abi Rabl, École des mines de Paris,

Carlo Rubbia, président de l'ENEA,

Jean-Paul Schapira, directeur de recherches émérite au CNRS,

Ionel Solomon, directeur de recherches à l'École polytechnique.



# Préface

---

Le considérable accroissement de la population mondiale et de la consommation matérielle des pays industrialisés au cours du dernier demi-siècle a radicalement changé la nature des problèmes géopolitiques posés par l'approvisionnement des hommes en nourriture, en eau, en énergie, par la pollution des sols ou de l'air, par la disparition des espèces animales et végétales, par l'exploitation des minéraux, etc. De ponctuels, ces problèmes sont devenus mondiaux. Nous avons hérité du XIX<sup>e</sup> siècle l'idée que la nature était inépuisable ; nous nous heurtons aujourd'hui à la constatation que nos ressources sont tarissables et que nos actions peuvent modifier la Terre sur laquelle nous vivons. Si la science ne peut naturellement pas suffire à résoudre ces questions de société, c'est elle seule qui permet de suggérer des solutions. C'est aussi elle qui nous fournit les bases indispensables à tout débat, car il est impossible sans elle de prévoir raisonnablement les conséquences des diverses décisions qui s'offrent à nous. Il importe donc que les données de la science soient accessibles à tout citoyen appelé à participer plus ou moins directement à des choix qui engagent l'avenir et, en particulier, à jauger objectivement, les propositions de ses représentants politiques en des domaines où fleurissent trop facilement les préjugés simplistes et les mythes, quand ce n'est pas la désinformation.

Parmi ces problèmes majeurs dont l'opinion se préoccupe à juste raison, les questions énergétiques sont celles qui nécessitent le plus de faire appel à la physique. C'est pourquoi la Société française de physique (SFP), dont l'une des missions est de favoriser les contacts entre grand public et physiciens, a organisé à travers notre pays des débats sur l'énergie centrés sur ses aspects scientifiques, essentiels en l'occurrence. Le présent livre prolonge et approfondit cette démarche. En tant que physiciens, les auteurs abordent les problèmes de

l'énergie avec la liberté d'esprit du chercheur, qui se doit d'examiner systématiquement toute chose sous ses divers aspects. Une telle attitude est essentielle ici, car chacune des sources d'énergie utilisées par l'homme – et elles sont nombreuses – possède ses avantages et ses inconvénients qu'il importe d'avoir identifiés. Ainsi, le calfeutrage des fenêtres lui-même, tout en permettant des économies sur le chauffage domestique, n'est pas sans risques. Il contribue probablement à l'augmentation des cas d'asthme observée depuis une trentaine d'années dans de nombreux pays. On a aussi découvert qu'il est responsable en Hongrie d'une accumulation, dans l'atmosphère des appartements, de radon, gaz radioactif émis par le béton des murs, à tel point que les habitants sont soumis chaque hiver à une irradiation supérieure à celle qu'ils ont subie du fait des retombées de Tchernobyl. Mais ce supplément à la radioactivité naturelle n'en représente qu'une faible fraction.

La vision globale et comparative des diverses formes d'énergie qui est offerte par cet ouvrage n'est malheureusement pas le souci de ceux qui, trop nombreux, s'abritent derrière le « principe de précaution » pour prôner certains choix discutables ou partisans. Cependant, notre Parlement, en donnant à ce principe force de loi, l'a assorti de deux réserves importantes, souvent méconnues. Les mesures « visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles » doivent à la fois avoir « un coût économiquement acceptable » et être « effectives et proportionnées », ce qui suppose une évaluation et une comparaison des conséquences des diverses possibilités. Une comparaison des risques a-t-elle été faite par le Danemark qui, par crainte du nucléaire, se repose sur les énergies fossiles pour produire son électricité ? Il est frappant de constater que c'est, de ce fait, le pays d'Europe qui, après le Luxembourg, émet vers l'atmosphère le plus de gaz carbonique par habitant : 50 % de plus que la France.

Peser le pour et le contre nécessite de s'appuyer sur des nombres. Ce livre rassemble dans ce but des données chiffrées, de nature scientifique, technique ou économique, qui mériteraient d'être plus connues. On saisit mieux les enjeux géopolitiques si on sait qu'au cours des cinquante dernières années la population mondiale a doublé, tandis que la production d'énergie quadruplait ; que la puissance moyenne consommée est de 8 kW pour un Américain du nord, de 5 kW pour un Européen, de 1 kW pour un Chinois et moins encore pour un Africain ; que le taux de gaz carbonique dans l'atmosphère a augmenté de 5 % au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, de 20 % au cours du XX<sup>e</sup>. Le lecteur découvrira au fil des pages les ordres de grandeur de diverses quantités, nécessaires à l'appréhension des problèmes énergétiques.

Certaines des données sont susceptibles d'être mieux comprises à l'aide d'un point de vue de physicien. La concentration en énergie des diverses sources reflète par exemple l'intensité des forces mises en jeu à l'échelle microscopique. L'interaction dite « forte », la plus intense de toutes, celle qui permet de lier entre eux protons et neutrons dans les noyaux atomiques, est exploitée dans les énergies nucléaires, extrêmement concentrées : par fission, 1 g d'uranium fournit dans une centrale nucléaire une énergie calorifique de 100 kWh ; par fusion, 1 g d'hydrogène engendre dans le Soleil 180 000 kWh de rayonnement. L'interaction électrique à l'échelle atomique entre particules chargées, plus faible, sous-tend les diverses énergies chimiques et thermiques, qui sont ainsi caractérisées par des chiffres comparables entre eux, considérablement plus faibles que les précédents : on obtient 1 kWh de chaleur en brûlant environ 0,1 kg de pétrole, de charbon ou de gaz, en condensant 1,6 kg de vapeur d'eau, ou en captant l'énergie solaire sur une surface de 1 m<sup>2</sup> pendant une heure. Enfin, les énergies gravitationnelles et mécaniques reposent sur des phénomènes physiques encore bien moins intenses, de sorte que leur mise en œuvre nécessite la manipulation d'énormes quantités de matière : pour libérer une énergie de 1 kWh, il faut faire chuter dans une usine hydraulique 3 tonnes d'eau d'une hauteur de 100 m, ou exploiter dans une éolienne 20 000 m<sup>3</sup> d'air arrivant à 60 km/h. Ceci éclaire la situation du Danemark signalée plus haut ; ce pays a fourni un effort considérable pour s'équiper en éoliennes, mais ne peut ainsi obtenir autre chose qu'un appoint, de sorte qu'il doit recourir principalement aux combustibles fossiles pour assurer ses besoins en énergie.

Une part notable de l'ouvrage est consacrée à la prospective. Elle s'appuie sur des acquis scientifiques, comprenant certaines avancées récentes de la physique qui ouvrent des possibilités nouvelles. La science peut en effet nous guider en précisant les contraintes imposées par les lois naturelles, nous empêchant à la fois de nous livrer au pessimisme et de pécher par excès d'optimisme. Ainsi, la physique des matériaux nous enseigne que la quantité d'énergie électrique que l'on peut stocker dans une masse donnée de matière ne dépasse pas une certaine valeur, dont nous approchons actuellement. Il existe ainsi une limite naturelle à la capacité des accumulateurs. Il ne faut donc pas trop rêver au développement des voitures électriques tirant leur énergie de batteries.

Il a naturellement été impossible aux auteurs d'énoncer des conclusions en se cantonnant au strict domaine scientifique, même si leurs convictions sont étayées par des arguments issus de la science. Cependant, leur ouvrage est



conçu de sorte que le lecteur puisse se former par lui-même une opinion raisonnée sur les problèmes énergétiques, qui conditionnent l'avenir de l'humanité. Il apporte en effet l'indispensable vision globale que l'information quotidienne, abondante mais inévitablement parcellaire, ne peut fournir, et rassemble les données essentielles qui doivent sous-tendre toute réflexion.

Roger Balian,  
ancien président de la Société française de physique,  
membre de l'Académie des sciences

# Sommaire

---

<b>Préface</b>	<b>5</b>
<b>Introduction</b>	<b>11</b>
<b>1. État des lieux</b>	<b>13</b>
1. Consommations	13
2. Réserves	14
3. Évolutions	16
<b>2. Les combustibles fossiles</b>	<b>21</b>
1. L'état des ressources et le pic pétrolier	21
2. Effet de serre et réchauffement climatique	24
3. Les débuts d'un effort planétaire : le protocole de Kyoto	33
<b>3. L'énergie nucléaire</b>	<b>37</b>
1. Réacteurs à fission	37
2. Un problème spécifique à l'énergie nucléaire : les déchets radioactifs	39
3. La gestion des déchets telle qu'elle est envisagée actuellement	42
4. Le nucléaire du futur	43
5. Et la fusion ?	53
<b>4. Les énergies renouvelables</b>	<b>57</b>
1. La géothermie	57
2. Énergie solaire	59
3. Les dérivés de l'énergie solaire	67

---

<b>5. Évolutions technologiques</b>	<b>75</b>
1. Les économies d'énergie	75
2. Capture et séquestration du CO <sub>2</sub> [51] [52]	78
3. Stockage de l'énergie	81
4. Le transport de l'énergie	82
5. Les moyens de transport	83
6. L'hydrogène, combustible de l'avenir ?	85
7. Les piles à combustibles	87
<b>6. Questions de prix</b>	<b>91</b>
1. Le prix du pétrole	91
2. Le prix de l'électricité	92
3. Coûts externes	95
<b>Conclusion</b>	<b>101</b>
<b>Annexes</b>	<b>103</b>
I. L'énergie en quelques chiffres	103
II. Diffusion des techniques	107
III. Les cycles de production dans les filières thorium et uranium	109
IV. Les coûts externes : Le programme ExternE	109
<b>Bibliographie</b>	<b>117</b>

# Introduction

---

La SFP a lancé depuis la fin des années 1990 un débat sur *l'Énergie au XXI<sup>e</sup> siècle*. Ce faisant, il semble qu'elle ait eu une prescience des événements qui se sont produits depuis : conférence de Buenos Aires, réticences, d'abord en Allemagne, puis en France, d'une partie non négligeable de la population vis-à-vis de l'industrie électronucléaire. Même si le Parlement français a voté le maintien d'un programme électronucléaire, il est probable que le débat national n'est pas clos.

Au sein de la SFP, le débat a pris la forme de conférences organisées par les sections locales. L'effort le plus systématique a été celui des sections Auvergne, Normandie, Paris-Sud, Paris-Centre et Grenoble, et a pris la forme de plusieurs demi-journées de débats et de conférences, ainsi que d'un séminaire Daniel Dautreppe. Dans d'autres sections, la réflexion a été faite dans un cadre plus modeste d'une ou deux conférences. D'une façon générale, les participants se sont montrés satisfaits par la qualité des exposés et la richesse des débats. Dans le document qui suit nous nous sommes efforcés de faire la synthèse des principaux enseignements que nous avons tirés de ces débats et conférences. En effet, il nous a paru urgent de fournir des éléments d'appréciation communs pour permettre à chacun de se forger une opinion. Il nous a semblé que, dès à présent, à partir de ces éléments, il était urgent que la SFP s'exprime sur la question d'une sortie éventuelle du nucléaire et sur les conséquences prévisibles d'une telle décision.

Le présent document traite de façon certes sommaire, mais, nous l'espérons, aussi objective que possible, l'évolution prévisible de la demande énergétique en regard des réserves ; les conséquences en terme de nuisance des modes de production choisis ; le rôle éventuel des formes variées d'énergies

renouvelables et du nucléaire ; finalement, la question essentielle des coûts est examinée.

Les débats sur les questions énergétiques sont toujours d'une actualité brûlante. Ils se prolongent au sein de la SFP. La seconde édition de cet ouvrage tient compte des évolutions rapides des données énergétiques dues au développement accéléré de pays émergents comme la Chine et l'Inde qui représentent ensemble 40 % de la population de la Terre. L'augmentation, sous l'effet des activités humaines, de la concentration des gaz à effet de serre et de ses conséquences climatiques fait l'objet d'une prise de conscience à tous les niveaux : institutions internationales, gouvernements, ONG, médias, citoyens. C'est devenu en quelques années un déterminant majeur des politiques énergétiques. Il convenait donc d'étoffer les parties relatives à cet aspect de la question.

La forme ramassée de l'ouvrage a été conservée. Pour des précisions plus techniques, on pourra consulter : *L'Énergie de demain, techniques, environnement, économie*, sous la direction de J.-L. Bobin, E. Huffer et H. Nifenecker, EDP Sciences 2005.

## 1. Consommations

L'état, en l'an 2005, de la consommation d'énergie à partir de différentes sources est présenté sur les tableaux 1 et 2. Pour rendre la comparaison entre les différentes sources d'énergie plus aisée, celles-ci sont toutes évaluées dans la même unité, à savoir la consommation équivalente en pétrole. Les données de 1996 sont rappelées afin de montrer la tendance récente.

Tableau 1 : Consommation annuelle planétaire [1].

Sources	GTep*		%
	1996	2005	2005
Charbon	2,35	2,93	27,9
Pétrole	3,34	3,84	36,5
Gaz naturel	2,03	2,47	23,3
Hydraulique	0,58	0,67	6,3
Nucléaire	0,55	0,63	6
Total	8,85	10,5	100
Traditionnel ** [2]	1,04	1,12 (2002)	
Renouvelables*** [2]	0,04	0,06 (2002)	

\* 1 GTep = 1 milliard de tonnes équivalent pétrole.

\*\* Exploitation de la biomasse, essentiellement le bois. Les évaluations correspondantes sont sujettes à caution faute de données fiables.

\*\*\* Hors hydraulique.

Le tableau 1, statistique planétaire, montre que les combustibles fossiles, charbon et hydrocarbures, sont la principale source d'énergie. Ils comptent pour près de 90 % du total (en excluant le traditionnel), dont 60 % pour les hydrocarbures. L'énergie nucléaire ne fournit qu'une part modeste, de l'ordre de 6 %, en raison de son usage exclusif pour la production d'électricité, qui ne représente elle-même que 38 % des besoins d'énergie globaux dans les pays développés et seulement 14 % si on considère la consommation d'énergie

mondiale. Malgré une forte croissance, l'éolien et le solaire, sous leur forme moderne, apportent une contribution négligeable.

Cette vue très générale est affinée par une analyse par pays, tableau 2. De toute évidence, des pays à forte capacité nucléaire, Allemagne, États-Unis, Grande-Bretagne, recourent à cette forme d'énergie de façon assez timide, surtout en comparaison de la France.

*Tableau 2 : Consommations primaires (2005 en Mtep) dans différents pays à partir des différentes sources, à l'exclusion de la biomasse traditionnelle [1].*

	<b>Charbon</b>	<b>Pétrole</b>	<b>Gaz</b>	<b>Nucléaire</b>	<b>Hydro</b>	<b>Total</b>
Allemagne	82,1	121,5	77,3	36,9	6,3	324
Chine	1081,9	327,3	42,3	11,8	90,8	1554
France	13,3	93,1	40,5	102,4	12,3	262
Grande-Bretagne	39,1	82,9	85,1	18,5	1,7	227,3
Inde	212,9	115,7	33	4	21,7	387,3
Japon	121,3	244,2	73	66,3	19,8	524,6
Russie	111	130	364,6	33,9	39,6	679,6
États-Unis	575,4	944,6	570,1	185,9	60,6	2336,6

La Chine et l'Inde méritent une mention spéciale. Dans ces pays en voie de développement rapide, la consommation d'énergie s'est considérablement accrue au cours de ces dernières années :

*Tableau 3 : Évolution de la consommation d'énergie (Mtep) en Chine et en Inde [1].*

	<b>1995</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>
Chine	694,6	667,4	1081,9
Inde	142,8	169,1	212,9

## 2. Réserves

En 2002, l'état des réserves en combustibles fossiles et nucléaires était représenté par les chiffres du tableau 4.

Ces données doivent être considérées avec précaution. En effet, l'effort de prospection dépend du niveau estimé des réserves. Par exemple, dans le cas du pétrole, le chiffre des réserves croît régulièrement depuis au moins 1940.

Tableau 4 : Réserves planétaires prouvées [2].

Source	GTep	Années de réserve au rythme de consommation actuel
Charbon bitumineux	335	139
Charbon sub-bitumineux	136	504
Lignite	47	190
Pétrole + GNL*	149	41
Gaz	201	91
Schistes bitumineux et Sables asphaltiques	Plusieurs centaines de GTep	Fraction exploitable non déterminée
Hydrates de méthane	Plus de 1000 GTep	Fraction exploitable non déterminée
Uranium (REP)**	32	88
Uranium (surgénérateur)	3500	10000

\* Gaz naturel liquide.

\*\* À un coût inférieur à 130 \$/kg.

Mais des études récentes [3, 4] et sur lesquelles nous reviendrons tendent à prouver que la tendance s'est inversée vers 1980. Le nombre réel (non biaisé par des influences politiques) d'années de réserve serait en diminution, ce qui laisse présager une production en baisse à partir de 2010-2020, après le passage du fameux « pic pétrolier ». Il faut toutefois compter avec des ressources non conventionnelles d'hydrocarbures : gisements des grands fonds océaniques, schistes bitumineux, sables asphaltiques, hydrates de méthane. Le potentiel de ces gisements non conventionnels est considérable, plusieurs fois supérieur à celui des gisements classiques. Mais l'exploitation de ces gisements pose en général de gros problèmes environnementaux, ainsi que des problèmes de coûts.

En ce qui concerne le nucléaire, si sa part de marché devait atteindre 30 %, le nombre d'années de réserve s'abaisserait à 40 ans pour une utilisation dans des réacteurs de type REP (Réacteur à Eau Pressurisée) et à 4000 ans dans le cas des surgénérateurs. Cependant, il deviendrait alors rentable d'exploiter des gisements à faible teneur (y compris les océans), ce qui augmenterait encore le nombre d'années de réserve. L'effet serait renforcé par la possibilité de mettre en œuvre le cycle du thorium.

Il faut aussi prendre en compte l'évolution de la demande en énergie au niveau mondial. La population mondiale compte aujourd'hui plus de 6,6 milliards



d'individus et continue d'augmenter. Mais le taux de croissance est passé par un pic aigu vers 1975 et les projections des Nations unies sont régulièrement revues à la baisse. Il est peu probable que la population globale se stabilise au cours du XXI<sup>e</sup> siècle [5]. Les études prévoient plutôt un sommet autour de 10 milliards ( $\pm 2$ ) vers la seconde moitié du siècle [6]. Or, une grande partie de cette population se trouve dans des pays émergents comme la Chine et l'Inde, dont la demande en énergie va être de plus en plus forte (sur la lancée de l'évolution mise en évidence par le tableau 3). Ceci aura forcément une incidence sur l'évaluation des réserves, même si les pays actuellement les plus gourmands parvenaient à réduire d'un facteur 2 leur consommation.

### 3. Évolutions

Il en va des données énergétiques comme du baromètre. L'important n'est pas tant la valeur instantanée d'un indicateur que de savoir s'il croît ou s'il décroît. Il convient donc de compléter les tableaux précédents par une analyse des tendances au-delà de l'aperçu général qui ressort du tableau 1.

#### 3.1. Un modèle

Il est possible de restituer assez fidèlement l'évolution des parts de marché dévolues aux différentes sources d'énergie en traitant chacune d'elle suivant un modèle diffusif. Le résultat d'un tel travail (effectué au sein de l'IIASA<sup>1</sup>) est présenté sur la figure 1, reproduite de Cesare Marchetti [7], où la variable F est la part de marché. L'historique recouvre une période de plus d'un siècle, pour laquelle nous disposons de statistiques fiables. La détermination empirique des constantes conduit, par simple extrapolation, à des prévisions s'étendant jusqu'en 2050 (courbes lisses). Comme pour tout modèle, l'intérêt du graphique est d'abord explicatif. Il fait apparaître la domination presque absolue des sources d'énergie fossiles, flagrante dans le tableau 1, dont il permet de suivre l'évolution dans le temps, passé et à venir. Tandis que la part du bois diminue régulièrement (elle semble sous-estimée ici pour la période récente, voir tableau 1), celle du charbon, sur une lancée datant de la seconde moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle, devenait prépondérante vers 1880, situation qui devait perdurer jusqu'en 1970.

Nous sommes maintenant dans l'ère des hydrocarbures, dont le modèle prévoit qu'elle pourrait s'étendre sur la plus grande partie du XXI<sup>e</sup> siècle. La part du pétrole atteint la saturation après un siècle de croissance. Celle du gaz,

<sup>1</sup> International Institute for Applied System Analysis, Laxenburg, Autriche.

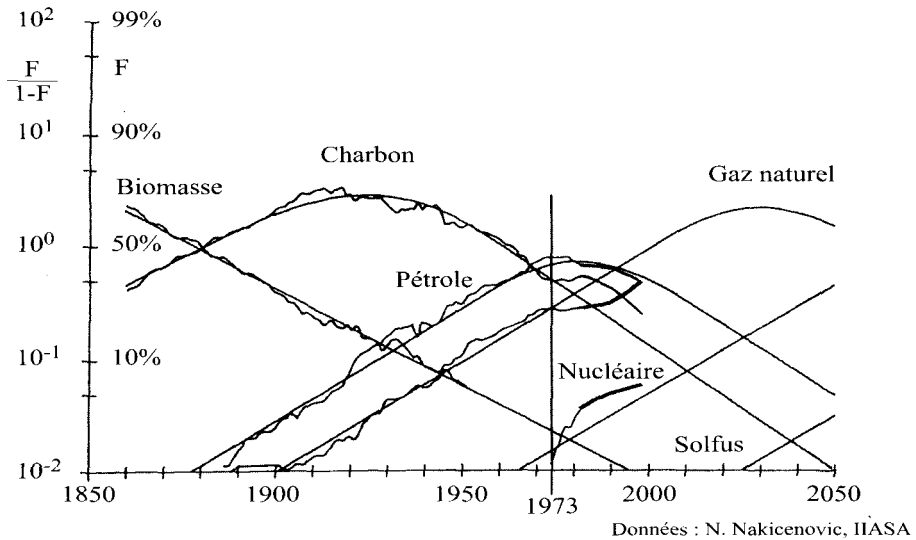


Figure 1 : Évolution des parts du marché de l'énergie (adapté de C. Marchetti, IIASA).

le plus écologique des combustibles chimiques, apparaît destinée à grandir encore. La part du nucléaire sort de la marginalité vers 1970, mais ne dépasse pas en ce début de siècle 6 % du total.

La comparaison au modèle des données économiques met en évidence des écarts particulièrement significatifs. Ainsi la « crise » consécutive au premier choc pétrolier de 1973 se traduit par d'importantes inflexions. La part de marché du pétrole est à peine touchée. Mais celle dévolue au charbon n'a plus décliné pendant une dizaine d'années, alors que celle du gaz stagnait et que celle de l'énergie nucléaire connaissait, en raison de politiques volontaristes, une croissance exceptionnellement rapide.

En matière de prévision, la prudence s'impose. Si la part du charbon est répartie à la baisse et celle du gaz à la hausse, tendances extrapolables, il est difficile de se prononcer pour le nucléaire : on observe une stagnation. Celle-ci est-elle durable ou assistera-t-on au contraire dans quelques années à une deuxième période de croissance plus lente ? Les incertitudes économiques et politiques ne permettent pas de trancher. De même, prédire une percée sur le marché, vers 2025, de l'énergie solaire ou de la fusion thermonucléaire (courbe étiquetée « solfus ») s'avère assez fantaisiste. On sait déjà que pour la fusion c'est hautement improbable (voir plus loin).

### 3.2. Pénuries ?

Les modèles diffusifs de l'IIASA représentent la compétition entre sources d'énergie. Ils ne prennent pas en compte l'éventualité d'un épuisement des réserves de combustibles fossiles. Où est donc passée cette épée de Damoclès qu'en 1972 le Club de Rome voyait suspendue au-dessus de nos têtes ?

Élaboré avec l'aide d'un modèle numérique conçu au Massachusetts Institute of Technology (MIT), le rapport du Club de Rome [8], qui en son temps fit tant de bruit, envisageait différents scénarios à partir des tendances de l'époque : croissance quasi exponentielle de la population et de la consommation d'énergie. Dans tous les cas étudiés, la raréfaction des combustibles conduisait vers l'an 2025 à un effondrement économique planétaire.

Contrairement à une théorie physique, un modèle numérique s'avère peu prédictif. Il ne vaut que ce que valent les hypothèses sur lesquelles il est bâti, surtout lorsqu'il est fermé, ce qui était le cas dans les simulations développées pour le Club de Rome. Or il s'est passé des événements extérieurs au modèle.

En 1973 eut lieu le premier choc pétrolier. Décision politique, le quadruplement brutal du prix du brut consécutif à la guerre du Kippour a renforcé la crainte d'une pénurie d'énergie par épuisement des ressources. Cette angoisse fut si vive que, comme le rappelle Pierre Bacher [9], une directive européenne datant des années 70, et restée lettre morte, interdisait de brûler du gaz naturel pour produire de l'électricité. Un tel sentiment, déjà apparu vingt ans plus tôt – c'était au début des années 50 – valait justificatif des premiers développements de l'énergie nucléaire. Dans les deux cas, il y eut erreur de diagnostic. Mais autant les Trente Glorieuses (1945-1973) furent marquées par une frénésie de consommation d'énergie, le fameux doublement en dix ans de la consommation d'électricité, autant les années suivant 1973 furent celles de la stagnation, à quelques fluctuations près, sans que l'accroissement du PIB, cet indicateur du niveau de vie, en souffre gravement. La figure 2 [10] montre cet effet. Au cours de la dernière décennie du XX<sup>e</sup> siècle, le prix du pétrole est redescendu à proximité de son niveau d'avant 1973. La consommation est alors repartie à la hausse, mais sur un rythme modéré en comparaison avec les Trente Glorieuses. En raison de la demande en provenance des pays émergents, elle n'a pas été freinée par la hausse des cours à laquelle nous avons assisté depuis, entre 2000 et 2006.

En provoquant les chocs pétroliers, les dirigeants moyen-orientaux avaient, sans le vouloir, rendu un signalé service à l'humanité. Chez les plus gros

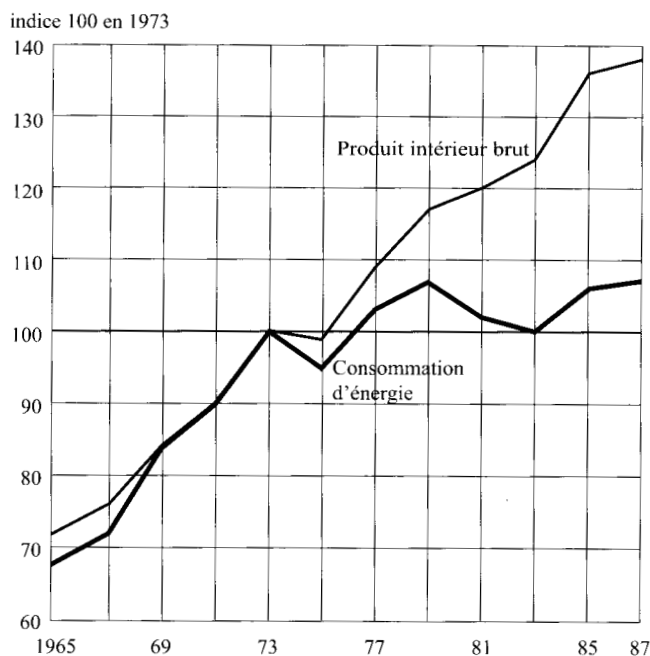


Figure 2 : Évolutions comparées du PIB et de la consommation d'énergie dans les pays de l'OCDE (base 100 en 1973). Le contrechoc pétrolier de 1989 a poussé la consommation d'énergie à la hausse, mais de façon modérée par comparaison avec la période d'avant 1973.

consommateurs, c'est-à-dire en Occident, on a, depuis 1973, appris à mieux gérer l'énergie. Les responsables, les médias, les opinions publiques ont d'abord craint l'imminence d'une véritable pénurie : fausse alerte. Mais la crise a fait apparaître deux idées complémentaires :

- il est possible de produire autant avec moins d'énergie ;
- en conséquence, les perspectives d'épuisement des réserves de pétrole s'éloignent.

Cette prise de conscience n'a eu lieu que dans les démocraties à l'occidentale, riches, voraces en énergie, mais où une opinion lucide a plus de chances qu'ailleurs d'être entendue. Hors de cet ensemble restreint, les statistiques montrent que la crise de 1973 n'avait pas eu d'influence sur la croissance de la consommation d'énergie. Il faut aussi remarquer que la chute du communisme s'est traduite par une décroissance brutale de la consommation énergétique dans les pays concernés due, d'une part, à la crise économique et, d'autre part, à l'amélioration de l'efficacité énergétique.

**I**

IFMIF 55

ITER 54, 55

**K**

Kyoto protocole de 25, 33

**L**

Le bois énergie 70, 117

LFR 29

**M**

Marchetti Cesare 16, 17

Modèle diffusif 16, 21, 119

Modèle logistique 16

MOX 42

MSR 48

Mur de Trombe 61

MYRRHA 51

**N**

Niveau des mers 27

**P**

Permafrost 24

Pic de Hubbert 23

Piles à combustible Types 88

PIUS 45

Pluies acides 28

Plasma 53, 54

Plutonium 38, 39, 42, 43, 48, 51, 52

Pollution atmosphérique 28, 30, 83, 86,  
116

Pompe à chaleur 58, 76

Population 15, 16, 18, 26, 56

Produits de fission 38, 40, 50, 52

PWR 37

**R**

Radiotoxicité 42, 43

Radon 39, 59, 76, 116

Réacteur hybride 49

Réacteurs génération IV 46, 86

Réacteur sous critique 49

Réactions de fusion 55, 106

REB 37

REP 37, 43

Réserves combustibles fossiles 14, 24,  
101

RNR 42

Ressources combustibles fossiles 15,  
18, 21, 23, 24Retraitement combustible nucléaire  
39, 42, 43, 49

Rubbia Carlo 50

**S**

Sables asphaltés 15, 23

SCWR 49

Schistes bitumineux 15, 23

SFR 46, 47

Société Française de Physique SFP 5,  
11

Spallation 50

SUPERPHENIX 47

**T**

Tchernoby 144, 102

Thorium 15, 39, 44, 48, 51, 52, 56, 57,  
111

Three Mile Island 44

Tokamak 54

Topex-Poseidon 27

Transports en commun 84, 85

**V**

**U**

Véhicules électriques 84, 87, 89

UOX 42

VHTR 48

Uranium 15, 37, 38, 44, 46, 49, 51, 52,  
57, 111

**Y**

Yucca Mountain 41