



La situation énergétique en France et dans le monde



Quels choix politiques ?

La situation énergétique en France et dans le monde

This page intentionally left blank



La situation énergétique en France et dans le monde

QUELS CHOIX POLITIQUES ?

Commission énergie-environnement
de la Société Française de Physique



17, avenue du Hoggar – P.A. de Courtabœuf
BP 112, 91944 Les Ulis Cedex A

Mise en pages : Patrick Leleux PAO

Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-0742-0

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 destinés 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^{er} 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, 2012

SOMMAIRE

<i>Préface</i> par Michel Lannoo, Président de la SFP	7
<i>Introduction</i>	9

Première partie :

Principaux aspects du système énergétique et de son évolution

Quelques définitions.....	13
Conjoncture et prospective.....	18
Coûts, bénéfices et risques.....	21
Décarbonisation	22
Recherche et développement.....	25
Économies d'énergie, sobriété.....	28
Constantes de temps	29
Conclusion.....	30

Deuxième partie :

Fiches

1. Ressources et réserves	35
2. Impacts environnementaux de diverses sources de production d'électricité	43
3. Risques, coûts, bénéfices des filières énergétiques	49

4. Coûts de l'énergie	61
5. Gestion de l'intermittence	67
6. Réseaux et stockages.....	73
7. Réseaux et super réseau européens de transport : électricité, gaz, pétrole, CO ₂	79
8. Réduction de la consommation	91
9. Stratégies de décarbonisation	95
10. De 2010 à 2050. Choix de politiques de l'énergie pour la France .	101
<i>Bibliographie</i>	105
<i>Index des termes et sigles employés</i>	109

PRÉFACE

Depuis plusieurs dizaines d'années, nos concitoyens prennent de plus en plus conscience des problèmes liés à la demande continuellement croissante de consommation d'énergie. Ceci a pu se faire grâce à d'innombrables débats et à des informations largement relayées par les media. Cependant les arguments échangés sont souvent basés sur des a priori qui leur confèrent un caractère irrationnel. Les politiques à suivre, quant à elles, doivent être basées sur une vision objective et à long terme de l'évolution de la situation. C'est dans ce but que nous avons confié à la Commission Énergie-Environnement de la Société Française de Physique la mission d'éclairer ce débat. Ceci a permis d'aboutir à l'élaboration d'un document concis, typique de l'approche des physiciens. Ce livre présente de façon aussi objective et équilibrée que possible des données susceptibles d'aider à la mise en place d'une politique à la fois réaliste et ambitieuse.

L'ensemble de l'argumentation est présenté de manière très adaptée à une lecture par les non-spécialistes voire

même par le grand public. Il consiste en une synthèse d'une douzaine de pages étayée par dix fiches contenant les données factuelles. De cette synthèse il ressort que, pour aboutir à une situation raisonnable dans un avenir proche (année 2050), il est indispensable de satisfaire aux impératifs suivants : modération de la consommation et mise en œuvre de toutes les sources d'énergie disponibles. Comme le détaille le texte, les grandes tendances devraient obéir à la règle dite des 3×50 (cf. p. 21) ainsi qu'à l'existence d'un « âge d'or » du gaz jusqu'en 2050, suivi d'un « âge d'or » de l'électricité. Toutefois la nécessaire diversification des méthodes de production et de distribution de l'énergie devrait s'appuyer, dès maintenant, sur une recherche à la fois fondamentale et appliquée et soutenue sur le long terme.

En conclusion il est clair que cet ouvrage atteint l'objectif visé, à savoir fournir une information basée sur des faits avérés et non partisane sur un problème essentiel pour l'avenir de l'humanité. Sa lecture doit être recommandée, non seulement aux décideurs, mais aussi à toute personne désireuse de se documenter sur un sujet qui suscite de nombreuses controverses.

Michel LANNOO

Président de la Société Française de Physique

INTRODUCTION

Depuis la première révolution industrielle à la fin du XVIII^e siècle, la consommation d'énergie n'a fait que progresser sous les effets conjugués de l'augmentation de la population et du développement de l'économie dont la croissance a été facilitée par la disponibilité d'une énergie abondante et peu coûteuse. En raison des quantités limitées de ressources contenues dans l'écorce terrestre et d'impacts négatifs sur l'environnement, ce mouvement séculaire ne pourra se poursuivre indéfiniment sous la même forme. Prise entre le désir de développement des peuples émergents et la nécessité de préserver une planète habitable, d'abord en limitant la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, l'humanité se trouve aujourd'hui à la croisée des chemins.

Dans ce contexte, les questions énergétiques prennent une importance cruciale. Les politiques à suivre doivent être basées sur la réalité des chiffres et choisies avec discernement en fonction de visions à long terme.

La Société Française de Physique a souhaité éclairer le débat à travers une information factuelle, décrite dans ce document rédigé par des membres de la commission

Énergie-Environnement à savoir Jean-Louis Bobin, Bernard Bonin, Jean-François Guillemoles, Elisabeth Huffer, Christian Le Brun, Jean-Marie Loiseaux, Jean Poitou, Henri Safa, Claude Stephan et Bernard Tamain.

L'approche de cette commission a été résolument transversale en examinant les défis auxquels les sociétés sont confrontées et, pour chacun d'eux, différentes façons dont technologies et options politiques peuvent y répondre. Ce livre se présente en deux parties :

- une revue des principaux aspects du système énergétique et de son évolution ;
- un ensemble de 10 fiches relatives aux questions qui se posent aujourd'hui en France comme dans le reste du monde. Ces fiches abordent différents thèmes présentés dans le tableau ci-dessous :

Thème	N° de la fiche	Titre de la fiche	Zone géographique
Production : avantages, inconvénients et coûts des différentes sources d'énergie	1	Ressources et réserves	Monde
	2	Impacts environnementaux de diverses sources de production d'électricité	Monde
	3	Risques, coûts, bénéfices des filières énergétiques	Monde
	4	Coûts de l'énergie	Europe
	5	Gestion de l'intermittence	Monde
Transport et distribution	6	Réseaux et stockages	France
	7	Réseaux et super réseau européens de transport : électricité, gaz, pétrole, CO ₂	Europe
Utilisations de l'énergie	8	Réduction de la consommation	France
Stratégies	9	Stratégies de décarbonisation	Monde
Évolutions	10	De 2010 à 2050. Choix de politiques de l'énergie pour la France	France

Première partie

Principaux aspects du système
énergétique et de son évolution

This page intentionally left blank

QUELQUES DÉFINITIONS

« L'énergie caractérise la capacité à fournir du travail, à donner du mouvement, à modifier la température ou à transformer la matière. »

Brochure du ministère de l'Économie et des Finances
Comprendre pour choisir, 2003

Cette grandeur abstraite et conservative se répartit à chaque instant entre diverses formes : cinétique, travail mécanique, électrostatique, chaleur... Produire de l'énergie revient à effectuer des transformations qui la mettent sous une forme utile à la société. On distingue :

- *l'énergie primaire*, première énergie produite dans toute chaîne de transformation. Par exemple la chaleur produite par les masses de combustibles consommés dont une fraction se retrouve sous une autre forme : travail mécanique, électricité...
- *l'énergie finale*, fraction de l'énergie primaire effectivement utilisable par le consommateur.

On mesure l'énergie en tonnes équivalent pétrole (tep) ou pour l'électricité en kilowattheures (kWh). Des multiples de ces unités sont adaptés aux situations rencontrées en pratique. Ainsi les quantités d'énergie s'expriment en Gtep

(milliards de tep ou gigatep) à l'échelle de la planète, en Mtep (millions de tep ou mégatep) à l'échelle d'un pays comme la France, ou en TWh (milliards de kWh ou térawattheure) dans le cas de l'électricité. Les réseaux électriques de gaz ou de chaleur sont des *vecteurs*.

LES UNITÉS

Les unités légales d'énergie (joule) et de puissance (watt, 1 W = 1 J/s) sont très petites donc mal adaptées à l'échelle industrielle. La pratique impose des multiples d'ordre élevé (tableau 1).

Tableau 1. Unités utilisées dans ce document.

Unités de puissance	Unités de production électrique	Unités d'énergie basées sur la tonne équivalent pétrole (Tep)
Kilowatt : 1 kW = 1 000 W	1 kWh = 1 000 Wh	
Mégawatt : 1 MW = 1 000 kW	1 MWh = 1 000 kWh	1 Tep = 11,7 MWh = 42 GJ (gigajoules)
Gigawatt : 1 GW = 1 000 MW	1 GWh = 1 000 MWh	Mégatep : 1 Mtep = 11 700 GWh
Térawatt : 1 TW = 1 000 GW	1 TWh = 1 000 GWh	Gigatep : 1 Gtep = 11 700 TWh

La *puissance*, mesurée en watts, est la *quantité d'énergie échangée par unité de temps*. On appelle :

- *Capacité* d'une installation, la puissance nominale de référence (le plus souvent un maximum) qui définit la taille d'un générateur d'énergie électrique, d'un moteur, d'un réseau...
- *Puissance instantanée*, la part de la capacité utilisée à un instant donné.

- *Puissance moyenne*, la quantité d'énergie rapportée à une durée de référence. Le *facteur d'utilisation* d'un générateur électrique est le rapport entre la puissance moyenne calculée sur une année et la capacité ; sa valeur constatée [électronucléaire 82 % (France 78 %¹), chimiques 50 %, hydraulique 50 %] est représentative de la façon dont on fait appel à telle ou telle source. Énergies *fatales*, l'éolien et le solaire ont une production intermittente ; le facteur d'utilisation est dans leur cas souvent appelé *facteur de charge* ; il peut se situer entre un peu moins de 10 % et 35 %.
- *Puissance garantie*, celle qu'un fournisseur d'électricité s'engage à procurer à ses clients avec une disponibilité proche de 100 %.

L'espèce humaine a besoin d'énergie, d'autant plus que la société est dans un état de développement avancé. Cette énergie provient de sources que l'on peut classer en deux catégories principales :

- Les *énergies de flux* plus connues sous le nom de renouvelables. La Terre est soumise en permanence au rayonnement solaire qui déverse par mètre carré orthogonal à sa direction de propagation une puissance d'environ 1000 W au niveau du sol par temps clair. La puissance reçue par la Terre a pour rôle premier d'entretenir la machine climatique. Directement (les diverses formes d'énergie solaire) ou indirectement (biomasse, éolien, hydraulique) l'humanité prélève une modeste partie de ce flux à son usage.
- Les *énergies de stock* qui consomment des combustibles chimiques ou nucléaires. Elles exploitent des gisements

1. En raison du suivi de charge alors qu'ailleurs l'électronucléaire ne produit qu'en base, cf. fiche 4.

nichés dans l'écorce terrestre². Les ressources contenues dans le sol ou les océans sont évidemment limitées. L'épuisement des stocks est à l'ordre du jour avec le fameux « pic pétrolier ».

LES SOURCES D'ÉNERGIE

Flux (renouvelables)

- *Solaire sous toutes ses formes : thermique qui convertit le rayonnement en chaleur à basse température ; thermodynamique à concentration qui convertit le rayonnement en chaleur haute température propre à faire fonctionner des machines ; photovoltaïque qui convertit directement en électricité.*
- *Biomasse qui comprend le bois énergie et les cultures énergétiques destinées à la fabrication d'agrocarburants.*
- *Éolien : énergie du vent utilisée pour faire tourner des moulins, des pompes ou pour produire de l'électricité.*
- *Hydraulique : mêmes usages que l'éolien avec en plus une possibilité de stockage dans des réservoirs en hauteur.*

Stocks (combustibles chimiques ou nucléaires extraits de l'écorce terrestre)

- *Charbon : abondant et peu coûteux, mais fort émetteur de gaz à effet de serre.*
- *Pétrole : prix en hausse, menaces de pénurie à moyen terme.*
- *Gaz : « âge d'or » en vue à condition d'exploiter les gisements non conventionnels (gaz de schistes).*
- *Uranium : pour l'électronucléaire toutes générations.*
- *Thorium : pour l'électronucléaire de génération IV.*

2. La consommation d'énergie par l'espèce humaine implique un flux : elle s'exprime par exemple en nombre de tep par an. L'essentiel en est obtenu à partir de stocks.

Les flux sont par nature inépuisables, du moins tant que le Soleil fonctionne. Au contraire les stocks ne contiennent que des quantités limitées de combustibles chimiques ou nucléaires. L'humanité les exploite sur un rythme élevé ce qui pose le problème de leur épuisement à terme. Plusieurs paramètres entrent en jeu dont d'abord leur contenu énergétique potentiel par unité de masse qui est repris dans le tableau 2.

Tableau 2. Contenus énergétiques (en mégajoule par kilogramme) de combustibles chimiques ou nucléaires.

	Combustible	MJ/kg
Réactions chimiques	Charbon	29
	Pétrole	42
	Gaz naturel	55
	Hydrogène	124
	Bois	14
Réactions nucléaires	Uranium (fission)	10^7
	Hydrogène (fusion)	3×10^8

Le contenu énergétique est de quelques dizaines de mégajoules par kilos pour les combustibles chimiques dont la combustion fait appel à un apport d'oxygène.

Les combustibles nucléaires ont un contenu énergétique des millions de fois supérieur à celui des combustibles chimiques. Mais lorsqu'il s'agit d'installations faites pour durer, une contrainte intervient : la tenue des matériaux. En conséquence, la densité de puissance émise ou reçue ne doit pas dépasser 100 W/cm^3 , ce qui est vrai aussi bien dans la chambre de combustion d'un moteur que dans le cœur d'une centrale nucléaire. Pour cette raison, à

puissance égale, une centrale à gaz est tout aussi compacte qu'une centrale nucléaire.

La différence entre les contenus énergétiques des combustibles intervient lorsqu'on examine les quantités consommées. Une réaction chimique libère par atome, une énergie 200 millions de fois moindre que celle qui est produite par la fission d'un noyau d'uranium. À l'état liquide ou solide, le nombre d'atomes par unité de volume est à peu près toujours le même. Prenant pour référence la tonne de pétrole qui occupe environ 1 m^3 , une énergie du même ordre de grandeur est libérée par $0,01 \text{ cm}^3$ soit 0,2 g de matière fissile, soit 7 g d'uranium enrichi à 3 % d'isotope fissile 235.

Cette différence se répercute au niveau des rejets et des déchets. Le système électronucléaire français ne génère chaque année que 300 tonnes de déchets radioactifs de haute activité (ceux qui posent problème³) à comparer aux 150 millions de tonnes de déchets industriels dont 6 000 tonnes de toxiques que notre pays doit aussi gérer.

CONJONCTURE ET PROSPECTIVE

Les combustibles chimiques fossiles représentent 81 % de l'énergie primaire dans le monde, 52 % seulement en France en raison du programme électronucléaire. Cette répartition est présentée dans le tableau 3.

3. La question des déchets nucléaires a été examinée par la Société Française de Physique dans les années 1990. Ce travail a conduit à la publication d'un dossier scientifique complet mis à jour dans un ouvrage de Bernard Bonin : cf. bibliographie.

Tableau 3. Répartition des sources d'énergie primaire en 2010⁴.

	Monde		France	
	Mtep/an		Mtep/an	
Hydrocarbures (pétrole et gaz naturel)	6900	52 %	125	48 %
Charbon	3600	27 %	11	4 %
Nucléaire	600	5 %	107	40 %
Biomasse	1200	9 %	15	6 %
Hydraulique (hydroélectricité)	800	6 %	5	2 %
Autres renouvelables (éolien, ...)		1 %		moins de 1 %
Total	13 100	100 %	263	100 %

4,8 Gtep dont 2/3 de fossiles pour une énergie finale de 21 000 TWh sont transportés et distribués via le vecteur électrique.

Tableau 4. Conversion pour la production d'électricité.

Mode de production		Rendement conventionnel	Énergie primaire (Tep) pour produire 1 MWh électrique
Électronucléaire	Fission de l'uranium	0,3	0,26
Thermique à flamme	Combustion de charbon ou d'hydrocarbures	0,4	0,22
Géothermie		0,1	0,86
Hydroélectricité, éolien, solaire		1	0,086

N.B. En ce qui concerne les prix, 10 €/MWh sont à l'échelle du consommateur individuel 1 c€/kWh.

4. Source : CEA, *Mémento sur l'énergie*, édition 2011.

Facteur de charge d'un générateur	15,63
Interconnexions européennes	84
Lissage par foisonnement	84
Stockage	73
Super réseau intelligent	83
Transport	27,71
Électronucléaire	15,18,19,26,40,53,65,102
Énergétique	
Ascèse	41
Contenu	17
Efficacité	58,79
Scénarios	101
Sobriété	58
Énergie	
Bénéfices	21
Coûts	10,21,61
De flux	15,38
De stock	15,35
Efforts d'économie	91
Finale	13
Impacts environnementaux	22,43,64
Offre et demande 2050	20,27,39,79,101
Primaire	13
Renouvelable	16,26,67
Risques	21,49
Sources	16
Stockage	70,74
Transport	24,27,92,94
Éolien terrestre	38,55,62,68,85
Éolien offshore	55,62,68,86
ExternE	22,64
Fission nucléaire	19,26
Fusion nucléaire	26
Gaz à effet de serre	20,43,51,65
Gaz naturel	35,50,88
Géothermie	19,38,58

Gestion du réseau	
Par délestage	72
Par stockage	70,73
Par substitution	70
Par transport	71
Groupe intergouvernemental d'experts sur le changement climatique (GIEC)	31,38
Hydrocarbures	19
Hydroélectricité	19,39,43,54,62,71
Hydrogène	17,28,70,99
Intermittence	67
Kilowattheure (kWh)	13
Lignes de courant continu haute tension (CCHT)	83
Pétrole, fuel	16,35,40,62,79
Puissance	
Densité de	17
Facteur de charge	64,68
Garantie	15,69
Installée	68
Instantanée	14
Monotone de	69
Moyenne	15
Nominale	67
Nominale de référence, capacité	14
Watt	14
Recherche et développement	25
Réseaux gaz, pétrole	79
Réserves	
Fossiles	36
Uranium	36
Scénarios	101
Solaire	
À concentration	57,82
Photovoltaïque	26,47,56,62,81