

LES ENJEUX DE L'ÉNERGIE

Après Fukushima

Estelle Iacona

Professeure de l'École Centrale Paris

Jean Taine

Professeur de l'École Centrale Paris

Bernard Tamain

Professeur émérite
de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Caen

DUNOD

Illustrations de couverture :
 Éoliennes : © TebNad-Fotolia.com
 Centrale électrique et mines de charbon, Grèce :
 © Airphoto-Fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements	d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
--	--



© Dunod, Paris, 2012
 ISBN 978-2-10-057493-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), 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 ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

Avant-propos	V
Introduction	I
I État des lieux	9
1.1 Consommation d'énergie dans le monde	10
1.1.1 Consommation d'énergie primaire par pays	10
1.1.2 Répartition par vecteurs de l'énergie	15
1.1.3 Consommation d'énergie et émission de CO ₂	20
1.1.4 Consommation finale d'électricité	22
1.1.5 Répartition par secteurs de la consommation finale en France	26
1.2 Réserves d'énergie non renouvelables	30
1.2.1 Sources d'énergie fossiles et minérales	30
1.2.2 Définition des réserves	33
1.2.3 Réserves mondiales prouvées	34
1.2.4 Répartition géographique des réserves prouvées	37
1.3 Les énergies renouvelables : ressources et limites	42
1.3.1 Le rôle clé du soleil	43
1.3.2 Répartition, dispersion et intermittence	47
1.3.3 Les gisements disponibles en théorie	50
1.3.4 Les évolutions des énergies renouvelables dans le monde	52
2 Contexte, contraintes et défis des futures décennies	57
2.1 Croissance de la consommation mondiale d'énergie	58
2.1.1 Croissance de la population mondiale	58
2.1.2 Consommation mondiale d'énergie par habitant	58
2.1.3 Croissance de la consommation d'énergie pour la fourniture d'eau	60
2.1.4 Facteurs contribuant à la diminution de la consommation d'énergie	64
2.2 Énergie et contraintes environnementales	65
2.2.1 Pollution d'origine non nucléaire	66
2.2.2 Pollution liée à un accident nucléaire	74
2.2.3 Gestion des déchets	79

2.3	Énergie et développement durable	84
2.3.1	Énergies renouvelables et territoires	85
2.3.2	Contraintes sur les matériaux clés	87
2.3.3	Coûts directs et coûts externes	91
2.3.4	Un exemple de développement durable	94
2.4	Acceptation sociale des technologies de l'énergie	97
2.4.1	Le rôle des médias	97
2.4.2	La perception des risques	98
2.4.3	L'arbitrage par les citoyens	101
2.5	La question du CO ₂	102
2.5.1	Les gaz à effet de serre	102
2.5.2	Vers une captation et une séquestration de CO ₂ ?	105
2.6	La question nucléaire	106
3	Voies futures et prospectives	115
3.1	Maîtrise de la consommation	116
3.1.1	Attitude du citoyen vertueux	116
3.1.2	Politique publique et réglementation pour le bâtiment	118
3.1.3	Transport et mobilité	120
3.2	Des sources vers les vecteurs : procédés de production	124
3.2.1	Vecteur gazeux : l'hydrogène	125
3.2.2	Vecteurs liquides	134
3.2.3	Vecteur électricité	137
3.2.4	Vecteurs chaleur	145
3.2.5	Cogénération d'électricité et de chaleur	148
3.2.6	Vers des vecteurs issus de la fusion au XXI ^e siècle ?	150
3.3	Solutions techniques futures pour l'utilisation de l'énergie	152
3.3.1	Nouvelles technologies pour le bâtiment	152
3.3.2	Éléments prospectifs sur l'automobile	170
3.3.3	Trois enjeux majeurs conditionnés par la recherche	184
	Conclusion	201
	Glossaire	209
	Annexe	215
	Bibliographie	219
	Index	225

Avant-propos

Cet ouvrage est issu de diverses expériences professionnelles des auteurs, scientifiques fortement impliqués dans la question énergétique. Professeurs de disciplines différentes (transferts thermiques et physique subatomique), dans des établissements différents, ils ont exercé ou exercent comme directrice du laboratoire EM2C, unité propre du CNRS à l'ECP, responsables de cours ou ensemble d'activités liés aux enjeux de l'énergie à l'ECP et à l'ENSICAen, responsable de la mention de master « Énergie » de l'ECP, chargés de mission dans différentes structures de différents ministères pour les questions énergétiques, etc. Ces fonctions ont conduit les auteurs à échanger en permanence avec des responsables de haut niveau des entreprises et des organismes publics du secteur de l'énergie, et des chercheurs de tous horizons dans des colloques à caractère stratégique sur l'énergie, en France et à l'étranger.

Universitaires, indépendants de toute attache avec une entreprise ou un organisme public à caractère industriel ou commercial, les auteurs ont développé des analyses communes de la question de l'énergie, qui s'écartent parfois des idées issues de la communication d'entreprises ou d'associations, ou même d'informations d'organismes officiels qui sont largement relayées sans discernement par la plupart des médias. Cependant, cet ouvrage n'est en aucun

cas un pamphlet, mais repose, essentiellement dans sa partie prospective, sur des prises de positions raisonnées, quelquefois à contre-courant.

Un grand recul est nécessaire pour aborder la question de l'énergie. Celle-ci est, en effet, de plus de plus étroitement liée dans toutes les régions du monde aux questions aussi vitales de l'eau et de l'alimentation humaine. De plus, les solutions énergétiques doivent intégrer les contraintes fortes liées à la gestion de l'effet de serre et de la pollution à l'acceptation, ou non, de l'énergie nucléaire par le corps social, à l'utilisation des sols et à l'aménagement des territoires, à la pénurie prévisible de matières premières clés, aux limitations actuelles des technologies, et surtout à la rentabilité économique.

De ce fait, la question de l'énergie, qui a une dimension géopolitique majeure, se pose, tant pour les sociétés que pour les entreprises, à toutes les échelles : mondiale, régionale, nationale, locale, domestique et individuelle. La solution de certains problèmes, comme les émissions de gaz à effet de serre, n'a de sens qu'à l'échelle mondiale ; la maîtrise de la consommation d'énergie dans les pays développés repose, en grande part, sur l'éducation et le civisme des individus.

L'ouvrage aborde quelques grandes interrogations, largement partagée par les opinions mondiales, sensibilisées depuis quelques années seulement à la question de l'énergie. Quelles seront les ressources d'énergie utilisables dans quelques décennies ? Quelle pourra être à cette échéance la contribution des énergies renouvelables ? Quels seront les vecteurs de l'énergie associés à ses principales utilisations, dans l'habitat et le secteur tertiaire, les

transports, l'industrie ? Quels seront les modes de production de ces vecteurs ? Les questions des émissions de CO_2 et d'acceptation des risques liés au nucléaire sont discutées au fil de l'ouvrage.

Le lecteur ne trouvera pas dans l'ouvrage de réponses catégoriques à ces questions à long terme, mais une analyse critique des solutions envisagées, mettant en évidence les verrous technologiques actuels, et prenant en compte les grandes échelles de temps requises par la plupart des mutations du secteur de l'énergie.

Estelle IACONA, Jean TAINÉ, Bernard TAMAIN

Mai 2011

Remerciements :

Nous tenons à remercier les personnes qui ont contribué, par des discussions passionnantes, à cet ouvrage : les membres du laboratoire EM2C et en particulier, Sébastien Candel, Nasser Darabiha, Daniel Durox, Philippe Scoufflaire, Denis Veynante, et Alain Walton ; ainsi que Jean-Pierre Chevalier, Pascal Da Costa, Arnaud Deschamps, Dominique Herrier et Yves VandenBoomegarde.

Définitions clés et unités :

Le lecteur trouvera les définitions des notions clés dans le glossaire. Les termes définis dans ce glossaire sont imprimés en italique à leur première occurrence. Les définitions des unités utilisées sont également accessibles dans le glossaire, à la rubrique Unités.

Préface

Après une lente, trop lente, montée en puissance, la conscience générale semble s'être réveillée sur un certain nombre des grands problèmes, non pas de l'heure, mais des décennies qui viennent. Les trois auteurs de cet ouvrage, avec leurs expériences et âges différents, font partie de ceux qui, depuis longtemps, se sont impliqués dans les différents problèmes de ressources énergétiques pour l'humanité. Ils s'y sont intéressés, par goût certes, mais aussi avec une volonté constante de faire partager leurs enthousiasmes et leurs interrogations, par des auditoires et des publics souvent très variés.

S'il est désormais banal d'indiquer les besoins en énergie, ceux concernant les ressources en eau, comme ceux associés à la gestion des déchets, pour ne pas parler des conséquences sur l'accroissement de l'effet de serre, on oublie un peu que l'une des raisons essentielles de l'apparition de ces situations se situe dans l'accroissement important de notre population sur Terre. Chaque jour ce sont près de 200000 habitants de plus (bilan des naissances et des décès) que doit accueillir notre planète.

Quelque soit l'âge du lecteur de cet ouvrage, on peut, pour illustrer cette évolution, indiquer par exemple qu'à la naissance du grand-père de sa grand-mère, ou de l'une des grands-mères de

l'un de ses grands-pères, ce qui n'est pas si loin dans le temps, le monde avait moins d'un milliard d'habitants.

Nous sommes aujourd'hui plus de 6 milliards, en route vers une « asymptote » ou un « plafond » – on commence à parler maintenant de stabilisation, voire de réduction – qui pourrait se situer à environ 8 à 10 milliards (plus personne ne parle de ces développements « exponentiels », qui plaisent tant au profane ou à certains technocrates par leur côté savant et mystérieux).

Si on ne perd pas de vue que la situation d'1 milliard environ de nos concitoyens sur Terre est parfaitement anormale (famine permanente, ressources en eau insuffisantes, voire inexistantes), on peut, sans être taxé d'un malthusianisme excessif, voir dans cette croissance forte de la population mondiale l'une des sources de nos difficultés, en particulier peut-être quand on cherche à réduire des inégalités qui sont toujours considérables.

La consommation moyenne par habitant sur la planète, par année, qui avait bien sûr fortement cru depuis les débuts de l'ère industrielle, avait amorcé en 1973, date du premier choc pétrolier, une certaine stabilisation, et ce jusqu'à ces toutes dernières années, pratiquement en 2002. Cette observation surprenait souvent : certes les pays en développement consommaient de plus en plus d'énergie, certes les pays « nantis » ne réduisaient pas significativement leur consommation individuelle, mais par un effet de moyenne pondérée les effectifs des pays en développement croissant fortement alors que les autres stagnaient, la moyenne est restée, pendant une trentaine d'années, sensiblement constante, à environ 1,5 à 1,6 tonne d'équivalent pétrole par habitant et par

an (dépendant, quant aux chiffres des différents types de biomasses agricoles qui y étaient intégrés).

L'observation d'une consommation moyenne mondiale d'énergie par habitant « relativement » stable, observation à laquelle il ne convenait pas d'attacher une importance excessive, permettait une estimation simple de ce qu'il fallait réaliser, *a minima*, comme investissement, à l'échelle mondiale, en énergétique.

Étant donné la puissance associée à une tonne d'équivalent pétrole par an, proche de 1400 W, étant donné l'accroissement quotidien de la population mondiale et la consommation mondiale individuelle moyenne, le constat était clair : chaque jour, il convenait de mettre en ligne des installations supplémentaires, d'environ 400 à 600 MW, en continu (même une centrale nucléaire ne produit pas 8800 heures par an). D'où l'importance du problème, le recours massif aux centrales électriques de types éprouvés, à charbon par exemple. C'est cette évolution globale qui est la principale raison pour laquelle le poids relatif, dans un système en forte expansion, des énergies renouvelables dans le bilan global ne s'accroît que très lentement. Dans un contexte où il faut vraiment faire « feu de tout bois », la question énergétique est revenue au cœur de bien des débats sur le développement.

Depuis 2002, la stabilisation évoquée de la consommation par habitant est mise à mal. La consommation par habitant a cru en effet, entre 2002 et 2010, d'environ 15 %. C'est ainsi qu'en prenant en compte l'accroissement de la population mondiale de 11 % dans la même période, on retrouve pour l'ensemble un accroissement global de plus de 25 % durant cette dernière décennie.

À propos des développements énergétiques, deux remarques peuvent d'ailleurs être faites, complémentaires et non opposées, malgré les apparences, correspondant à des propos souvent tenus par des interlocuteurs ayant une très forte sensibilité aux dimensions écologiques du développement humain.

La première consiste à constater que notre alimentation, mesurée par exemple par la disponibilité énergétique alimentaire, est d'environ 2700 kilocalories par habitant et par jour, soit environ 130 W. Elle fait appel à des consommations énergétiques plus modestes que le train de vie énergétique mondial moyen, supérieur à la consommation alimentaire d'un facteur multiplicatif d'environ 15, soit 2000 W par habitant et par an. N'est-il pas tentant alors de fustiger des modes de vie, occidentaux, modernes et excessifs, « décalés » par rapport à ce que peut fournir notre Terre ?

L'autre approche consiste à considérer que nos besoins énergétiques moyens par habitant et par an, les 2000 W évoqués ci-dessus, sont tout à fait modestes quand on les compare à ce que nous recevons du Soleil. Même en décomptant l'albédo, cette proportion du rayonnement solaire réfléchi ou diffusé n'intégrant pas la structure « Surface Terrestre - Atmosphère », bien mesurée par satellite et proche de 30 %, ce sont près de 20 MW qui arrivent sur Terre par habitant, soit près de 10000 fois notre consommation d'énergie ! N'est-il pas tentant alors de « pousser » à fonds les « feux » solaires, pour résoudre nos problèmes proches ou anticiper la fin inéluctable des combustibles fossiles ?

C'est sans doute dans ces nouveaux espaces que constituent le « solaire » et en particulier le « solaire thermodynamique » que