



InterSections

Prospectives énergétiques à l'horizon 2100

Données, contraintes et scénarios

Jean-Louis Bobin

Prospectives énergétiques à l'horizon 2100

Données, contraintes, scénarios

Jean-Louis Bobin



Illustrations de couverture :
Lawrence Livermore National Laboratory (photo à gauche).

Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-0806-9

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^{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 2013

Sommaire

Préface	7
Avant-propos	9
Partie 1 Synthèse des travaux de l'atelier Énergie 2100	13
Chapitre 1 • Introduction	15
Chapitre 2 • Problématique d'une future transition énergétique	19
2.1 Projections de la demande	19
2.2 Projections de l'offre	21
2.3 Enjeux industriels, états et marchés.....	22
Chapitre 3 • Facteurs d'évolution	25
3.1 Impacts environnementaux et contrainte climatique.....	25
3.2 Maîtrise des stocks et des flux d'approvisionnement.....	26
3.3 Les réponses technologiques	27
3.4 Acceptabilité sociétale.....	27

3.5	Économie et coûts de l'énergie.....	29
3.6	Vulnérabilités.....	29
Chapitre 4 • Horizon 2050		31
4.1	Contexte.....	31
4.2	Projections.....	32
Chapitre 5 • Pistes pour les choix structurants à long terme.....		37
5.1	Problématique de la demande énergétique	37
5.2	Technologies : vers un menu à la carte	38
5.3	Perturbations	39
Chapitre 6 • Conclusion.....		41
Partie 2 Données, contraintes, scénarios		43
Chapitre 7 • Introduction		45
7.1	Énergie, développement, ruptures.....	45
7.2	Les grandes transitions.....	47
7.3	Ordres de grandeur.....	48
7.4	Les grands défis	48
7.5	Un peu de rétrospective.....	50
Chapitre 8 • L'énergie et ses sources.....		55
8.1	Énergie et puissance.....	55
8.2	Flux et stocks.....	58
8.3	Contenu énergétique des combustibles	61
8.4	Ressources et réserves des énergies de stock : charbon, pétrole, gaz naturel, uranium et thorium	63
8.5	Systèmes énergétiques.....	67
8.6	Les couloirs de l'énergie.....	69
Chapitre 9 • Population et demande d'énergie.....		73
9.1	Démographie.....	73
9.2	Niveau de vie et demande d'énergie.....	77
9.3	Les grandes peurs.....	83
Chapitre 10 • La contrainte climatique.....		87
10.1	Flux, effet de serre et climat	87
10.2	Les gaz à effet de serre.....	91
10.3	Impacts environnementaux : des gaz à effet de serre aux températures ...	96

Chapitre 11	• Tendances, évolutions et crises.....	105
11.1	Substitution énergétique.....	105
11.2	Épuisement des ressources et piquisme.....	109
11.3	L'activité économique et ses cycles.....	113
11.4	Décarbonisation : vers des ruptures inévitables.....	117
11.5	Évolution du prix des hydrocarbures et crises.....	123
11.6	Les ingrédients d'une crise majeure en 2025-2030.....	125
Chapitre 12	• Le contexte technologique d'ici 2050, première partie : les flux.....	127
12.1	Potentialités des énergies de flux : généralités.....	127
12.2	Potentialités et limites de la biomasse.....	129
12.3	Potentialité et limites des énergies solaires.....	134
12.4	Les potentialités du vent.....	139
12.5	Autres renouvelables.....	141
12.6	Stockages.....	147
12.7	Gestion des énergies intermittentes.....	153
Chapitre 13	• Le contexte technologique d'ici 2050, deuxième partie : stocks, risques, vecteurs.....	159
13.1	Retour sur les potentialités des énergies chimiques fossiles.....	159
13.2	Les énergies nucléaires.....	165
13.3	Analyse des risques relatifs aux différentes sources d'énergie.....	171
13.4	Le vecteur hydrogène.....	174
13.5	La mise en réseau.....	175
Chapitre 14	• Vers l'étape 2050 : lignes d'action et scénarios.....	179
14.1	Une prospective dominée par les contraintes environnementales.....	179
14.2	Offre et demande à l'horizon 2050.....	182
14.3	Les acteurs.....	184
14.4	De modestes tentatives pour répondre à la contrainte climatique.....	185
14.5	Une stratégie générale : les biseaux à la Pacala-Sokolow.....	189
14.6	Scénarios.....	193
14.7	Problèmes d'équité.....	205
Chapitre 15	• Politiques de l'énergie : contraintes et options.....	209
15.1	Maîtrise de l'énergie et des émissions à la production.....	210
15.2	Maîtrise de l'énergie à la consommation.....	214
15.3	Signaux prix.....	217
15.4	Robustesse et vulnérabilité des systèmes énergétiques.....	222
15.5	Politiques européennes.....	224

15.6	Politiques de l'énergie en France	229
15.7	Programmes d'urgence (« crash programs ») ?	231
Chapitre 16	• La seconde moitié du siècle	233
16.1	Quelle transition énergétique ?	233
16.2	Les trajectoires de l'IIASA.....	235
16.3	Le XXI ^e siècle, version écologiste	241
16.4	Nouvelles technologies nucléaires pour la fin du siècle	242
16.5	Nouvelles technologies renouvelables pour la fin du siècle	247
16.6	État de technologies pendant la seconde moitié du siècle	252
16.7	D'autres programmes d'urgence ?	257
16.8	Ingénierie climatique (« geoengineering ») : un ultime recours ?	259
Chapitre 17	• Pour conclure : Réflexions sur les réponses technologiques aux problèmes énergétiques du XXI^e siècle	263
Bibliographie	267
Annexes	269
Index	273

Préface

« *Assurons-nous bien du fait* » écrivait Fontenelle en commençant son histoire des oracles. La prospective, qui a pris le relai du discours hésitant et putatif sur l'avenir a plus que jamais besoin de cet impérieux conseil. Dans une Europe incertaine et dépendante pour ses approvisionnements, où coexistent des politiques énergétiques si hétérogènes qu'elles en sont presque contradictoires, le retour aux faits est devenu une nécessité.

Le groupe de travail animé par Jean-Louis Bobin s'est assigné comme tâche d'écouter dans chaque registre de l'énergie les meilleurs spécialistes et de livrer au public dans cet ouvrage une description des faits pertinents. L'abondance de la documentation recueillie est telle qu'un second volume sera nécessaire pour compléter, dans lequel seront traitées les énergies renouvelables.

La question énergétique a fait et fera encore l'objet de débats passionnés. Toutefois, un consensus se dégage au moins sur deux points :

- le premier est que la pollution et la teneur en gaz carbonique de l'atmosphère ont augmenté, du fait de l'activité humaine, dans des proportions telles que la poursuite de l'évolution actuelle risque de rendre la planète inhabitable et/ou d'engendrer des effondrements de la biosphère ;

- le second est qu'on ne peut espérer que le fonctionnement du marché, auquel certains semblent vouer un véritable culte, règle ce problème. Il n'y a pas non plus, comme on faisait semblant de le croire autrefois, des technique dominantes qui puissent prendre en charge l'essentiel des approvisionnements.

La sécurité demande une diversité, les choix raisonnables sont ceux du juste milieu, nécessaires pour équilibrer les risques. Telles sont les conclusions qu'illustre cet ouvrage.

Merci à Jean-Louis Bobin et son groupe pour la qualité et l'ampleur de leur travail. Le sujet de l'énergie, trop souvent encombré de préjugés et de réactions affectives, méritait bien qu'on revienne aux faits.

Thierry GAUDIN
Ingénieur Général honoraire des Mines
Président fondateur de Prospective 2100

Avant-propos

par J.-L. Bobin et L. Deschamps

« Prospective 2100 »¹ a été fondée en 1995 par Thierry Gaudin, Ingénieur Général des Mines, ancien Directeur du Centre de Prospective et d'Évaluation du Ministère de la Recherche et de la Technologie. L'objet de cette association est de promouvoir la prospective auprès des décideurs et de sensibiliser l'opinion à la nécessité d'anticiper l'avenir.

L'activité est structurée en clubs autour de grands thèmes de réflexions comme l'énergie, le jardin planétaire, la communication, les programmes spatiaux, l'enseignement et la culture technique, la métrologie du quotidien, l'urbanisme, les cités marines, les utopies... Elle prend diverses formes :

- des conférences du soir sur les technologies et les relations entre techniques et société, et des débats sur la transition de civilisation² ;
- des travaux de groupes constitués en ateliers qui se réunissent de façon périodique ou en séminaires (de 2 jours à une semaine) sur des programmes affichés (par exemple énergie, jardin planétaire ou cités marines).

1. <http://www.2100.org/>

2. Cf. par exemple *Pour une société meilleure*, Philippe J. Bernard, Thierry Gaudin Susan George, Stéphane Hessel, André Orléan, l'aube (2011).

L'association effectue aussi, sur commande, des études prospectives sur les interactions technoscience/société et contribue à la promotion de technologies susceptibles de jouer un rôle important dans le futur prévisible.

L'énergie, abondante et à bas prix, est au cœur d'une civilisation technicienne que l'on appelle par commodité « occidentale » et qui continue de s'étendre à la surface de la Terre comme en témoigne le développement accéléré des BRIC (Brésil, Russie, Inde, Chine) et d'autres nations. C'est un sujet majeur de réflexions pour « Prospective 2100 ». L'atelier « Énergie 2100 » qui s'est réuni de 2008 à 2012 avait pour objectif de dessiner une prospective énergétique pour la fin du siècle en se fondant sur les potentialités de technologies considérées aujourd'hui comme porteuses d'avenir. La plupart des participants, étant ingénieurs de formation, ont privilégié une approche technique et économique. Il serait souhaitable que ce livre suscite de la part de sociologues et de spécialistes de la géopolitique des réflexions susceptibles d'enrichir la vision présentée ici.

Une littérature abondante traite d'énergie. Des agences publiques ou privées, des groupes industriels, des ONG, élaborent des scénarios en se servant de modèles numériques, procédure que le club de Rome avait inaugurée en 1972³. Les scénarios valent ce que valent les hypothèses qui ont servi à les établir. Ils sont très divers et concernent des durées qui s'étendent sur quelques décennies, rarement jusqu'à la fin du siècle. Il n'était ni dans la vocation ni dans les moyens de l'atelier d'entrer dans ce jeu, mais un important travail a été consacré à une analyse critique des scénarios publiés par d'autres pour d'une part, en dégager de grandes tendances et d'autre part, évaluer le réalisme de différentes options.

Il apparaît que se dessine une transition énergétique planétaire qui fera passer l'humanité de l'âge du carbone fossile à une nouvelle ère dont rien ne permet aujourd'hui de dire par quelles sources d'énergie elle sera nourrie. À la fin des années 1980, une étude prospective d'une certaine ampleur avait mobilisé plusieurs centaines de chercheurs sous l'égide du Ministère de la Recherche. Elle annonce une rupture systémique qui serait le passage de la civilisation industrielle, appuyée sur les matériaux et l'énergie, à une civilisation cognitive, structurée par les technologies de l'information et confrontée à un inquiétant déséquilibre écologique. Le temps nécessaire est difficile à évaluer, mais dans l'ouvrage⁴ rédigé à la suite de cette étude, on relève ce passage à propos de l'environnement :

« Le contrôle véritable du climat et des pollutions planétaires est repoussé à la seconde moitié du vingt-et-unième siècle, à cause de l'inertie de la machine industrielle, des difficultés à comprendre scientifiquement les mécanismes météorologiques et de la pression conservatrice des intérêts économiques. »

La difficulté de comprendre scientifiquement les mécanismes météorologiques (et surtout climatiques) est, vingt ans plus tard, en partie levée dans le sens d'un

3. Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, Wiliam W. Behrens III, *The limits to growth*, Universe bookq (1972).

4. *2100, récit du prochain siècle*, sous la direction de Thierry Gaudin, Payot (1990).

renforcement de la contrainte environnementale. Mais l'inertie de la machine industrielle et la pression conservatrice des intérêts économiques sont toujours là et destinées à perdurer. Elles pèseront sur l'évolution de la transition énergétique. Ces facteurs imposent à la réflexion sur l'énergie de porter sur une période s'étendant au moins jusqu'à la fin du siècle.

Cela laisse le temps à des technologies encore balbutiantes de passer du stade de l'expérimentation à celui de l'industrialisation au point éventuellement de prendre une place significative dans le paysage énergétique : sources d'énergie, réseaux de transport, mobilité... On peut aussi espérer une évolution des mentalités au fil de la succession des générations. Ce qui apparaît aujourd'hui (in)acceptable sera peut-être considéré tout autrement par nos descendants.

Pour éclairer la réflexion, de nombreuses présentations ont été faites devant l'atelier. Elles ont été complétées par des conférences insérées dans le programme des soirées de « Prospective 2100 ». On trouvera en annexe la liste des présentations et des conférences. Elles ont porté sur de multiples aspects de la problématique de l'énergie : les techniques, les tendances, les impacts sociétaux. Elles ont été suivies de discussions parfois vives et toujours enrichissantes. L'ensemble constitue une part importante de la documentation sur laquelle se sont appuyés les travaux du groupe.

Celui-ci s'est estimé peu compétent sur tout ce qui concerne les applications énergétiques de la biomasse, appelées selon certains⁵ à prendre une importance accrue. Aussi, à l'initiative d'Henri-Hervé Bichat, un groupe technique spécialisé a été créé, comprenant des représentants de l'administration, de laboratoires et de l'industrie. Ses conclusions sont intégrées sous forme résumée dans les chapitres qui vont suivre. Deux membres de l'atelier ont en parallèle préparé une publication sur la biomasse-énergie à destination du grand public⁶.

La première partie du présent ouvrage est une synthèse des travaux de l'atelier « Énergie 2100 ». Elle contient, en 7 courts chapitres, les éléments à partir desquels se construira la nécessaire transition énergétique et qui sont détaillés dans la seconde partie. Celle-ci est divisée en 9 chapitres. Des données relatives à l'énergie et aux populations qui en bénéficieront sont contenues dans les deux premiers chapitres. Les deux suivants discutent des contraintes dont les principales sont la menace climatique (chapitre 10) et la disponibilité des ressources chimiques fossiles (chapitre 11) qui présente aussi les tendances passées et actuelles ainsi que les facteurs d'évolution dont les crises. La double inertie du système industriel et des conservatismes institutionnels détermine en partie l'évolution jusqu'au milieu du siècle. Une transition énergétique ne pourra être qu'amorcée pendant cette période dans un contexte technologique faisant l'objet des chapitres 12 et 13. Les scénarios correspondants sont examinés dans le chapitre 14. Des éléments de politique sont précisés dans le chapitre 15. Enfin le chapitre 16 est consacré à la seconde moitié du siècle avec une évaluation comparative de technologies du très long terme.

5. Cf. par exemple <http://www.negawatt.org/scenario-negawatt-2011-p46.html>, <http://srren.ipcc-wg3.de/>

6. Henri-Hervé Bichat, Paul Mathis, *La biomasse, énergie d'avenir ?*, éditions Quae, 2013.

Vj k' r' ci g' k' p' v' g' p' v' k' p' c' m' (' i' g' h' v' d' i' c' p' m

Partie

1

Synthèse des travaux
de l'atelier Énergie 2100

Vj k' r ci g' k' p v g p v k' p c m (' i g h ' d i e p m

Introduction

L'augmentation de la population humaine et le développement « à l'occidentale », qui ne concerne encore qu'une minorité, se traduisent par une immense demande mondiale d'énergie.

Aujourd'hui dans la continuité d'une évolution entamée à la fin du XVIII^e siècle, les sources d'énergie dont dispose l'humanité sont à 85 % des combustibles chimiques et plus rarement nucléaires, qui produisent de la chaleur, utilisée soit directement, soit pour animer des machines thermiques. Or charbon, pétrole et gaz (80 % de la production d'énergie) sont des ressources limitées et leur combustion libère dans l'atmosphère de grandes quantités de gaz à effet de serre. Il en résulte la perspective d'une inéluctable pénurie et la menace d'un changement climatique. Une telle « civilisation thermique¹ » n'est pas durable. De fait, les sociétés se trouvent confrontées à une série de questions que l'Atelier Énergie de l'association « Prospective 2100 » s'est proposé d'examiner.

Existe-t-il une alternative hors d'une décroissance volontaire ou imposée ? Comment au XXI^e siècle, les sociétés pourront-elles trouver les moyens de satisfaire des besoins énergétiques toujours croissants ? Si les ressources actuellement inventoriées sont

1. Expression proposée par J.P. Karsenty, du centre Alexandre Koyré, CNRS.

insuffisantes, en reste-t-il à découvrir ? Quelles technologies de remplacement mettre en œuvre ? Sera-t-on capable de contrôler leurs impacts humains et environnementaux ?

Les réponses impliquent des choix de société, mis en pratique après décisions politiques. Afin de fournir des éléments qui permettent de dessiner des avenir possibles, la réflexion a porté sur les aspects mondiaux, régionaux et aussi locaux. Les systèmes énergétiques sont extrêmement complexes et leur devenir se présente sous de multiples facettes. Il dépend d'évolutions en cours qui leur sont soit externes : démographiques, sociologiques, économiques, géopolitiques... soit internes : technologiques. Par ailleurs il est souhaitable d'aller vers plus d'efficacité, avec des modalités différentes au cours du temps et selon les pays, et vers moins d'impacts sur l'environnement et la santé. Ainsi seraient réduits les coûts financiers, environnementaux et humains. Produire, transporter et distribuer l'énergie mettent en jeu des infrastructures de plus en plus lourdes. C'est un facteur d'inertie et de déterminisme, une décision ayant souvent des conséquences sur une période de 40 à 50 ans, voire plus longue. Tous ces éléments interviennent dans les diverses projections que l'on peut élaborer tant pour la demande que pour l'offre d'énergie au XXI^e siècle. Les choix doivent être guidés par la prise en compte et l'optimisation des paramètres économiques, culturels, géographiques et sociopolitiques, dont les réticences sociétales.

La dynamique de la demande d'énergie suit une tendance lourde à la hausse. Il s'agira de satisfaire au mieux cette demande, mais sans doute jusqu'à une certaine limite et en proposant des choix énergétiques susceptibles de contribuer à la croissance de l'économie tout en s'efforçant de respecter l'environnement. À l'horizon 2100, on ne peut faire abstraction de ruptures provoquées par des innovations techniques ou imposées par la nécessité de prévenir des catastrophes environnementales (pollutions régionales et menace d'un changement climatique).

La dynamique des évolutions technologiques relève d'un double effet combiné : l'amélioration continue des performances, des coûts et de la sécurité des techniques mises en œuvre, qui relève de la courbe d'apprentissage et de l'efficacité ; l'apparition de sauts technologiques, susceptibles de modifier localement ou globalement l'offre ou la demande.

L'analyse à laquelle a procédé l'atelier a cherché à mettre en perspective les caractéristiques des divers moyens de production et de distribution de l'énergie. On a insisté sur l'aspect global en faisant porter les comparaisons sur les filières énergétiques prises chacune dans son ensemble et en relation avec les autres filières et la société. Différents points de vue ont été adoptés :

- Historique d'une technologie : création, développement, pénétration sur le marché et position par rapport à des grands cycles économiques. Pour les grosses installations : mise en œuvre, phase de production, maintenance et démantèlement (partiel ou retour à l'état initial de l'environnement ?).
- Systémique par la prise en compte des conséquences qu'une nouvelle technologie peut occasionner : complément de service opposé à une dégradation,

incompatibilité opposée à la complémentarité, acceptabilité opposée à la nuisance, ponction sur des ressources limitées.

- Écologique : on sait dès à présent identifier l'impact environnemental à court et moyen termes de certaines technologies. Mais, on est incapable d'estimer convenablement les effets à long terme, comme de se prémunir des aléas exceptionnels.
- Sociétal par la perception des risques et les problèmes d'acceptabilité qui en découlent. Ainsi les événements survenus au Japon en 2011 renforcent l'obligation d'une analyse permanente des risques encourus, tout au long de la vie d'une installation.
- Géopolitique, d'abord parce que l'énergie concerne le monde entier par dessus les frontières nationales, ensuite en raison du souci de chaque état d'assurer la sécurité de ses approvisionnements.

La présentation qui va suivre a été structurée autour de 4 grands thèmes :

- D'abord des évolutions comparées de l'offre et de la demande d'énergie à partir de la conjoncture actuelle (chapitre 2).
- Ensuite, un examen des facteurs qui agiront sur les systèmes énergétiques pendant la première partie du XXI^e siècle (chapitre 3).
- Puis des projections pour le moyen terme, basées à la fois sur une certaine continuité et des ruptures potentielles, tandis que des efforts de recherche et développement dans de multiples directions préparent l'avenir (chapitre 4).
- Enfin, pour le plus long terme, en fonction de la maturité attendue de nouvelles technologies, des pistes pour des choix structurant une nécessaire transition énergétique (chapitre 5).

Vj k' r ci g' k' p v g p v k' p c m' ' i g h' d r e p m

2

Problématique d'une future transition énergétique

2.1 Projections de la demande

L'évolution démographique prise globalement est assez bien déterminée jusqu'en 2050, plus incertaine au-delà. On attend autour de 9 milliards d'habitants au milieu du siècle. Viendra ensuite le temps d'une évolution lente, mais le niveau atteint en 2100 reste très incertain. Par ailleurs, l'évolution de la répartition géographique des populations, prise régionalement, semble également établie de façon fiable : prolongation de la tendance à une urbanisation poussée et à d'importantes migrations rassemblant les populations le long des côtes et dans des mégapoles. Ceci va sans doute favoriser une concentration de la demande en des aires géographiques restreintes, souvent éloignées des zones d'extraction des combustibles ou d'implantation des renouvelables. Toutefois, cette concentration, hormis les problèmes sociaux et environnementaux qu'elle pourrait poser, devrait offrir un avantage en limitant la demande de transports individuels, énergivores et polluants.

Si le standard de vie des pays émergents va sans doute s'élever sur la période, il ne semble pas très facile de cibler son étiaje, car il dépendra d'une évolution des mentalités (prises de conscience ou non des risques écologiques) et de l'efficacité énergétique des technologies utilisées. Or les disparités sont grandes entre la consommation

transition énergétique 10
trinité des contraintes 68
triple 20 européen 188
triple 50 31

U

unités 56
urbanisation 19, 47

W

WEC (*World Energy Council*
(conseil mondial de l'énergie)) 64,
183, 236
WRI (*World Resources Institute*) 94