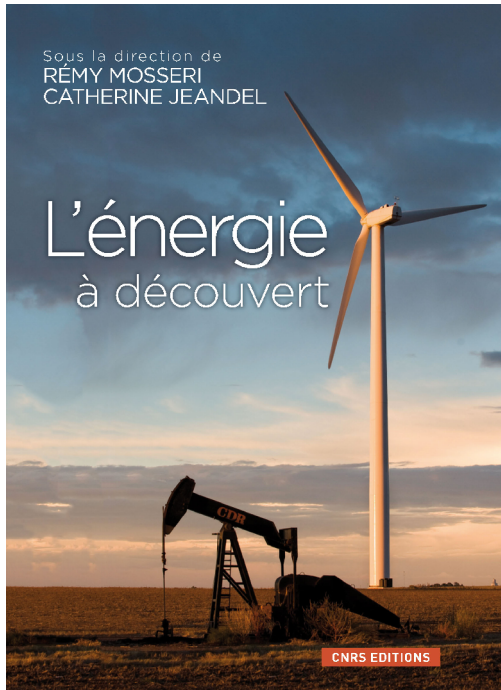


Sous la direction de
RÉMY MOSSERI
CATHERINE JEANDEL

L'énergie à découvert

CNRS EDITIONS

Extrait de la publication



L'énergie est devenue une question vitale pour les sociétés, le citoyen, l'humanité tout entière. Sujet scientifique, économique, politique et écologique majeur, elle suscite des débats, parfois violents, sur les choix à faire aujourd'hui et leurs conséquences pour l'avenir des hommes et de la planète. Mais, alors que se tient le grand débat national sur la transition énergétique, comment se forger une opinion objective sans connaître les données scientifiques les plus complètes sur les potentiels et les limites de chaque source d'énergie? Ce livre les met enfin à la disposition du public.

L'énergie, qu'est-ce que c'est? Quelles sont les grandes lois physiques qui la gouvernent? Comment la produire, la transporter, la stocker? Le solaire, la biomasse, l'éolien, l'hydraulique sont-ils des solutions alternatives suffisantes? Et quelle part leur réserver à l'avenir? Les nombreux articles de ce livre (près de 130) proposent au citoyen des outils pour se faire une opinion face à ces questions. Physiciens, chimistes, biologistes, géophysiciens, environnementalistes, géographes, économistes, y précisent, chiffres et schémas à l'appui, la place respective des énergies fossiles, du nucléaire et des énergies renouvelables. Au-delà, ils expliquent quelles sont les perspectives offertes par la science sur le mix énergétique, le problème du stoc-

kage, l'amélioration de nos usages de l'énergie, ses impacts environnementaux et sanitaires.

Un panorama complet pour tout savoir sur les enjeux de l'énergie au XXI^e siècle.

*Rémy Mosseri, physicien, et Catherine Jeandel, océanographe et géochimiste, ont dirigé ensemble cet ouvrage, comme ils l'avaient fait pour *Le Climat à découvert*, CNRS Éditions 2011. Leur projet a reçu le soutien d'Alain Fuchs, président du CNRS. Ils ont été aidés ici par un comité éditorial pluridisciplinaire, composé de :*

Pascal Brault, physicien

Bruno Goffé, géologue

Jean-Charles Hourcade, économiste

Étienne Klein, physicien

Daniel Lincot, chimiste

Yvon Maday, mathématicien

Didier Mayer, physicien

Xavier Montagne, chimiste

Marc Rousset, biologiste

Jean-Luc Trancart, hydrologue

L'énergie à découvert



Sous la direction de
Rémy Mosseri
Catherine Jeandel

L'énergie à découvert

CNRS ÉDITIONS

Suivi éditorial et graphique:
Elsa Godet - www.sciencegraphique.com

© CNRS Éditions, Paris, 2013
ISBN : 978-2-271-07678-6

Table des matières

Préface	
<i>Alain Fuchs</i>	14
Avant-propos	
<i>Rémy Mosseri et Catherine Jeandel</i>	15

- Première partie -

INTRODUCTION

1. Les dynamiques mondiales de l'énergie	
<i>Patrick Criqui</i>	19
2. Énergie, effet de serre et changement climatique	
<i>Valérie Masson-Delmotte, Hervé Le Treut et Didier Paillard</i>	22
3. Énergie et environnement : la nécessité des approches territoriales	
<i>Claude Kergomard</i>	26
4. Quelle histoire pour l'énergie ?	
<i>Mathieu Arnoux</i>	29
5. Prospective énergétique : modèles contre futurologie	
<i>Jean-Charles Hourcade</i>	32
6. Dans la jungle des grandeurs et des unités	
<i>Catherine Jeandel, Matthieu Tissier et Remy Mosseri</i>	34

- Deuxième partie -

QUELQUES ASPECTS FONDAMENTAUX

1. L'énergie, une grandeur « qui se conserve »	
<i>Étienne Klein</i>	39
2. L'énergie sous ses différentes formes	
<i>Sandra Bouneau</i>	40
3. L'énergie : aspects thermodynamiques	
<i>Matthieu Tissier</i>	42
4. Énergie et matière : radioactivité, fission, fusion	
<i>Olivier Méplan</i>	44
5. Énergie et lumière	
<i>Jean-Michel Raimond et Serge Haroche</i>	46
6. Effet photovoltaïque : principes physiques	
<i>Jean-Paul Kleider</i>	48

7. Énergie : aspect hydro- et aéro-dynamiques	
<i>Jean-Marc Chomaz</i>	50
8. L'énergie et le vivant	
<i>Fabrice Rappaport, Francis Haraux et Francis-André Wollman</i>	54
9. La combustion	
<i>Sébastien Candell et Daniel Durox</i>	58
10. La catalyse	
<i>Bruno Chaudret</i>	60
11. Matériaux pour l'énergie	
<i>Claude Delmas</i>	62
12. Vue générale de l'intérieur de la Terre	
<i>Henri-Claude Nataf</i>	65
13. Matière et énergie : stocks et cycles	
<i>Bruno Goffé</i>	67
14. Les métaux rares pour l'énergie	
<i>Patrice Christmann</i>	70
15. Stockage de l'énergie, aspects fondamentaux	
<i>Pascal Brault et Annick Percheron-Guégan</i>	72
16. Le transport de l'électricité	
<i>Marie-Cécile Alvarez-Hérault et Bertrand Raison</i>	74
17. Éléments de modélisation systémique	
<i>Daniel Krob</i>	76
18. Sécurité et sûreté des systèmes critiques	
<i>Albert Benveniste</i>	78

- Troisième partie -

LES ÉNERGIES FOSSILES

1. La formation des ressources fossiles	
<i>Raymond Michels et Alain-Yves Huc</i>	83
2. Exploration des bassins sédimentaires et production des hydrocarbures : outils et verrous	
<i>François Roure et Yves Lagabrielle</i>	86
3. Les hydrocarbures non conventionnels	
<i>Roland Vially et François Kalaydjian</i>	89
4. Fracturation hydraulique et alternatives	
<i>Gilles Pijaudier-Cabot</i>	92
5. Filière charbon : estimation des ressources et valorisation	
<i>Geneviève Bessereau et Alain-Yves Huc</i>	94

6. Simulation numérique en exploration et production pétrolières	
<i>Roland Masson</i>	96
7. Pétrole et gaz : réserves et évolution du profil mondial de production	
<i>Nathalie Alazard-Toux</i>	98
8. Pétrole : les différents carburants	
<i>Xavier Montagne</i>	100
9. Pétroles lourds et fond du baril	
<i>Michel Vrinat et Christophe Geantet</i>	102

- Quatrième partie -

L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

1. Du projet Manhattan au nucléaire civil	
<i>Jacques Percebois</i>	107
2. Principe de fonctionnement d'un réacteur et cycle du combustible	
<i>Sylvain David et Bernard Bonin</i>	110
3. Les réacteurs à eau sous pression de deuxième et troisième générations	
<i>Paul Reuss</i>	113
4. Le démantèlement	
<i>Philippe Guiberteau</i>	115
5. Les matériaux du nucléaire	
<i>Yves Bréchet</i>	116
6. Traitement du combustible nucléaire usé et déchets	
<i>Christian Simon, Jean-François Dufrière et Christophe Poinssot</i>	118
7. Entreposage et stockage	
<i>Benjamin Rotenberg et Michel Cathelineau</i>	120
8. Réacteurs régénérateurs de quatrième génération	
<i>Franck Carré et Maurice Leroy</i>	122
9. La filière thorium	
<i>Elsa Merle-Lucotte</i>	124
10. De nouveaux réacteurs pour l'incinération des déchets nucléaires	
<i>Annick Billebaud et Sylvain David</i>	126
11. Fusion par confinement magnétique, le projet ITER	
<i>Pascale Hennequin</i>	127
12. Simulation numérique de la fusion magnétique	
<i>Éric Sonnendrücker</i>	130

1. Introduction	
<i>Frédéric Ravel</i>	135
2. Eau et énergie	
<i>Ghislain de Marsily et Jacques Miquel</i>	136
3. Hydraulique : les énergies marines	
<i>Aurélien Babarit</i>	140
4. Biomasse : de nombreuses filières pour des enjeux importants	
<i>Marc Rousset</i>	143
5. Biomasse : filières thermochimiques	
<i>Jacques Lédé</i>	145
6. Biomasse : filière ligno-cellulosique, filière bois	
<i>Herman Höfte et Henri-Pierre Fierobe</i>	146
7. Biomasse aquatique, micro-algues	
<i>Jean-Paul Cadoret et Jack Legrand</i>	148
8. Les promesses des micro-algues pour la production de biodiesel	
<i>Antoine Sciandra et Gilles Peltier</i>	150
9. Bioraffinerie	
<i>Jean-Luc Duplan</i>	152
10. Les lipides microbiens	
<i>Jean-Louis Uribelarrea, Stéphane Guillouet et Carole Molina Jouve</i>	153
11. Biomasse : production de biohydrogène	
<i>Éric Latrille, Éric Trably, Franck Chauvat et Corinne Cassier-Chauvat</i>	154
12. Biomasse : biopiles à combustible	
<i>Elisabeth Lojou, Alain Bergel et Serge Cosnier</i>	155
13. Structure et mécanisme des hydrogénases	
<i>Christophe Léger et Sébastien Dementin</i>	156
14. Biomasse : filière chimique bio-inspirée	
<i>Vincent Artero, Frédéric Gloaguen, Marc Fontecave et Philippe Schollhammer</i>	158
15. Modélisation et ingénierie de la photosynthèse	
<i>Jean-François Cornet et Olivier Bernard</i>	160
16. Biomasse et déchets pour la production de bioénergies	
<i>Jean-Philippe Steyer, Éric Trably et Jérôme Hamelin</i>	162
17. La ressource solaire : importance et moyens de caractérisation	
<i>Philippe Blanc, Bella Espinar, Lucien Wald</i>	163
18. Silicium cristallin : de la cellule au module	
<i>Jean-Pierre Joly et Abdelilah Slaoui</i>	165

19. Photovoltaïque : les filières couches minces	
<i>Pere Roca i Cabarrocas et Negar Naghavi</i>	168
20. Photovoltaïque : la filière organique	
<i>Cyril Brochon, Éric Cloutet, Guillaume Fleury et Georges Hadziioannou</i>	170
21. Photovoltaïque à très haut rendement de conversion	
<i>Jean-François Guillemoles</i>	172
22. Le solaire thermique basse température	
<i>Philippe Papillon</i>	174
23. Solaire à concentration : chaleur, électricité et combustibles de synthèse	
<i>Gilles Flamant et Alain Dollet</i>	176
24. Études de sites, atlas des vents et potentiel éolien	
<i>Philippe Dandin, Franck Baraer, Dominique Giard, Pierre Lassègues, Victoire Laurent et Christelle Robert</i>	179
25. Éolien : aspects scientifiques	
<i>François Cauneau</i>	182
26. Éolien : le couplage au réseau	
<i>Xavier Guillaud</i>	184
27. L'éolien <i>offshore</i>	
<i>Daniel Averbuch</i>	186
28. Géothermie : estimation des ressources mondiales	
<i>Bernard Sanjuan</i>	188
29. Géothermie : différentes filières pour des utilisations très variées	
<i>Romain Vernier</i>	190
30. L'hydrogène naturel	
<i>Bruno Goffé et François Guyot</i>	193
31. Carbone renouvelable et durabilité	
<i>Paul Colonna et Benoît Gabrielle</i>	194
32. Les conditions sociotechniques du développement des ENR	
<i>Marie-Christine Zélem</i>	196

- Sixième partie -

ENTRE SOURCES ET USAGES : STOCKAGE ET VECTEURS D'ÉNERGIE

1. Introduction aux vecteurs et aux stockages d'énergie	
<i>Bernard Tardieu</i>	201
2. Apports de la chimie pour de meilleurs accumulateurs	
<i>Patrice Simon, Jean-Marie Tarascon</i>	202
3. Les supercondensateurs	
<i>Thierry Brousse et François Béguin</i>	204

4. Les piles à combustible	
<i>Gérald Pourcelly</i>	206
5. Le vecteur hydrogène	
<i>François Le Naour</i>	208
6. Stockage solide de l'hydrogène	
<i>Daniel Fruchart</i>	211
7. Le stockage par pompage	
<i>Pierre-Louis Viollet</i>	212
8. Stockage magnétique : le SMES	
<i>Pascal Tixador</i>	213
9. Le stockage mécanique	
<i>Pierre Odru</i>	214
10. Le stockage thermique et thermochimique	
<i>Xavier Py</i>	216

- Septième partie -

USAGES DE L'ÉNERGIE ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

1. Introduction aux usages de l'énergie	
<i>Didier Mayer</i>	221
2. Efficacité énergétique : la combustion	
<i>Mourad Abdelkrim Boukhalfa</i>	222
3. Efficacité énergétique : l'éclairage	
<i>Georges Zisis</i>	224
4. La cogénération	
<i>Iskender Gökalp</i>	226
5. Efficacité énergétique des bâtiments : l'isolation thermique, les nouveaux matériaux	
<i>Hervé Arribart</i>	228
6. Efficacité énergétique des bâtiments : performance et localisation	
<i>Daniel Quenard</i>	230
7. Le projet ADREAM	
<i>Michel Diaz</i>	232
8. Efficacité énergétique : les technologies de l'information	
<i>Olivier Sentieys</i>	233
9. Efficacité énergétique : l'intégration des systèmes industriels	
<i>Gilles Hétreux et Raphaële Théry</i>	236
10. La valorisation des chaleurs fatales : un potentiel important encore trop peu utilisé	
<i>Bernard Lachal</i>	238

LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SANITAIRES

1. Introduction aux impacts environnementaux et sanitaires	
<i>Catherine Jeandel et Rémy Mosseri</i>	243
2. Gaz de schiste : une source d'énergie qui fait débat	
<i>Normand Mousseau</i>	244
3. Gaz de schiste : impacts environnementaux	
<i>François Renard</i>	246
4. Gaz de schiste et gaz à effet de serre	
<i>Camille Yver et Philippe Ciaï</i>	249
5. Les barrages ont-ils un impact environnemental négligeable ?	
<i>Hervé Piégay</i>	250
6. Barrages et gaz à effet de serre	
<i>Dominique Serça et Frédéric Guérin</i>	252
7. Les impacts environnementaux de l'énergie nucléaire	
<i>Bernd Grambow</i>	253
8. Les impacts sanitaires de l'énergie nucléaire	
<i>Florent de Vathaire</i>	256
9. Les différents types de pollution en lien avec l'énergie	
<i>Émilie Perraudin et Éric Villenave</i>	260
10. L'ingénierie écologique au service de la durabilité énergétique	
<i>Thierry Dutoit</i>	262
11. Captage et stockage géologique du CO ₂	
<i>Daniel Broseta, Jean-Philippe Torrè et Éric Favre</i>	264
12. La valorisation du CO ₂	
<i>François Moisan</i>	266
13. De nouveaux solides poreux hybrides pour la capture du CO ₂	
<i>Christian Serre et Gérard Férey</i>	268
14. Les coûts externes de l'énergie : les projets ExterneE de la CE	
<i>Ari Rabl</i>	269
15. Analyse du cycle de vie et temps de retour énergétique	
<i>Isabelle Blanc et Didier Beloin-Saint-Pierre</i>	270
16. Impacts territoriaux et compensations socio-environnementales	
<i>Julie Gobert</i>	272

- Neuvième partie -

LE NOUVEAU MIX ÉNERGÉTIQUE ET SES CONSÉQUENCES

1. Introduction au mix énergétique	
<i>Pascal Brault et Alain Dollet</i>	277
2. Bouquet énergétique et énergies renouvelables	
<i>Jean-Jacques Bézian</i>	278
3. Les <i>smart-grids</i> ou réseaux électriques intelligents	
<i>Nouredine Hadjsaid et Jean-Claude Sabonnadière</i>	280
4. L'économie des <i>smart-grids</i>	
<i>Patrice Geoffron</i>	282
5. Les défis de la gestion optimisée des <i>smart-grids</i>	
<i>Michel De Lara</i>	284
6. Énergies renouvelables et territoire : nouveaux accès, nouveaux potentiels	
<i>Olivier Labussière</i>	286
7. Transitions énergétiques urbaines	
<i>Jonathan Rutherford</i>	288
8. Transition énergétique et nouveaux modèles organisationnels	
<i>Dominique Finon</i>	290
9. Avenir du mix énergétique	
<i>Francis Kovacs</i>	292

- Dixième partie -

QUESTIONS OUVERTES

1. L'énergie au XXI ^e siècle : les nouveaux défis	
<i>Michel Colombier</i>	297
2. Bien identifier les verrous technologiques pour accélérer la transition énergétique	
<i>Bernard Bigot</i>	300
3. Enseigner l'énergie à la fois comme concept scientifique et comme bien public	
<i>Cécile de Hosson et Luc Valentin</i>	302
4. Les scientifiques dans le débat public sur l'énergie	
<i>Rémy Mosseri</i>	304
5. Les utopies en énergie	
<i>Daniel Lincot</i>	306
6. Débat sociétal, éthique et politique	
<i>Nicole Belloubet</i>	308

- Onzième partie -

COMPLÉMENTS

Glossaire

Contributeurs

Laboratoires, instituts et organismes

Préface

Alain Fuchs

En 2011, CNRS Éditions publiait *Le climat à découvert*, recueil d'articles décrivant les outils et les méthodes en recherche climatique. Catherine Jeandel et Rémy Mosseri avaient coordonné ce travail, au nom du Comité national de la recherche scientifique. Encouragés par la réception extrêmement favorable de l'ouvrage, Catherine et Rémy ont pris l'heureuse initiative de renouveler l'exercice, en l'appliquant au très vaste domaine de l'énergie, des ressources jusqu'aux usages. J'ai soutenu ce projet avec enthousiasme et je suis heureux qu'il ait pu être mené à bien.

Les raisons sont nombreuses pour inciter toujours davantage les chercheurs à s'impliquer dans le dialogue entre science et société. Les questions dites « de société », comme celle du climat ou de la transition énergétique, ne se résument certes pas à la recherche de solutions scientifiques et techniques. Il n'en reste pas moins que la science, toute la science, a son mot à dire. On ne peut pas accepter que les scientifiques occupent un strapontin dans ces débats.

Le panel d'auteurs mobilisés pour cet exercice est impressionnant. La variété des appartenances institutionnelles illustre l'étendue et la richesse de la communauté française, regroupée au sein d'ANCRE, l'alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie. Tout aussi impressionnant, est l'effort que chacun a accompli pour rendre son exposé intelligible pour une audience d'honnêtes hommes (femmes) du début du XXI^e siècle, ce vaste public avide d'outils et de connaissances qui lui permettent de mieux participer aux nécessaires débats citoyens.

Merci encore une fois à Catherine Jeandel et Rémy Mosseri pour ce deuxième ouvrage d'« utilité publique » !

Avant-propos

Rémy Mosseri et Catherine Jeandel

Cet ouvrage fait suite à celui publié en 2011, *Le climat à découvert*, état de l'art des outils, recherches et connaissances sur le climat. Dès la sortie de celui-ci, traiter la question de l'énergie s'imposait, tant elle est liée à la première, et fondamentale pour toutes les sociétés humaines. La volonté de ce nouvel opus est donc de permettre aux chercheurs, essentiellement du monde académique (universités et organismes de recherche) d'exposer, à un niveau technique abordable, l'état de l'art d'un large domaine d'intérêt sociétal. Il en diffère cependant en ce que la communauté scientifique travaillant sur l'énergie est beaucoup plus diverse et hétérogène que celle qui se fédère autour des questions climatiques. Sur la question de l'énergie, les moyens de la produire sont si divers qu'ils engagent plusieurs communautés très distinctes, voire même concurrentes lorsqu'il s'agit de des orientations et de faire des choix.

La question climatique conjugue à la limitation des ressources fossiles place la transition énergétique comme un enjeu sociétal majeur. En effet, ce début de XXI^e siècle impose aux sociétés humaines de faire des choix sur les techniques d'usage, de production et de distribution de l'énergie. Ces choix – politiques au sens noble du terme – s'appuieront sur des débats citoyens, à l'instar de celui qui s'engage en France en 2013. Les décisions ne pourront se faire de façon participative et conduire à des solutions acceptables pour le plus grand nombre que si elles sont éclairées.

Décider entre divers scénarios devra s'assurer de la plausibilité des filières et des étapes, sur les plans scientifique, technique, industriel comme économique, le tout dans une dynamique qui tienne compte de la situation de l'existant. Le monde de la recherche a donc toute sa place dans ce contexte complexe et dans les débats de société induits; mais pour être entendu, il doit aussi faire l'effort de présenter ses travaux d'une façon plus largement accessible qu'au cercle académique habituel. C'est l'objet du présent exercice.

L'énergie couvre un champ pluridisciplinaire très large, entre ressources et usages. Le choix a été fait ici de privilégier les premières (de façon évidemment non exhaustive), en traitant largement des filières fossiles, nucléaires et renouvelables, mais également des problèmes de stockage. Après un premier chapitre introductif présentant le contexte général et un second reprenant quelques principes de base, les trois chapitres qui suivent détaillent les catégories principales de ressources énergétiques: fossiles carbonées, nucléaires et renouvelables. Le chapitre sur les énergies renouvelables est particulièrement fourni en textes, reflet de la multiplicité des sources potentielles et du foisonnement de recherches dans ces domaines. Les deux chapitres suivants traitent de la question du stockage, puis des usages et de l'efficacité énergétique. Sont ensuite abordés les impacts sanitaires et environnementaux associés aux différentes ressources, et enfin, les contenus asso-

ciés au mix énergétique. Les contraintes économiques et sociales de l'épuisement annoncé des énergies fossiles et de la mise en place d'une transition énergétique sont abordées de manière transversale dans l'ouvrage. Ainsi, un certain nombre de textes traite des comportements humains, du déploiement territorial, de scénarios économiques, etc.

Il est assez naturel qu'un chercheur, dans la passion qui l'anime, soit aussi dans ce cas le premier supporter de la filière qu'il alimente de ses travaux. Mais comme scientifique, il (elle) doit pouvoir faire la part entre les faits, ses convictions et ses opinions. La ligne éditoriale a été de privilégier les premiers, et nous avons le sentiment que les auteurs, responsables de leur texte, ont su ici jouer le jeu. Le lecteur avisé saura d'ailleurs relativiser les quelques fois où certains auteurs n'ont su tempérer leur enthousiasme...

Cet ouvrage n'aurait pu exister sans de multiples participations et soutiens. Un comité éditorial efficace pour sélectionner les thèmes à couvrir et les auteurs, un soutien de la direction du CNRS, et de son président qui a accepté de préfacer l'ouvrage; une mobilisation de l'ensemble des auteurs pour le finaliser en un temps record; CNRS Éditions qui en a accompagné la réalisation jusqu'à sa parution. Mais encore et surtout, Elsa Godet, qui en a été la cheville ouvrière, compétente, dynamique et enthousiaste, pendant toute l'année de sa réalisation.



- PREMIÈRE PARTIE -

Introduction

Page précédente :

Maîtriser l'énergie, un vieux rêve... © Gavin Mills. ■

