

Sous la direction de
RÉMY MOSSERI
CATHERINE JEANDEL

L'énergie à découvert



057850

CNRS EDITIONS

ECL 158

Sous la direction de
Rémy Mosseri
Catherine Jeandel

057850

(2)



L'énergie à découvrir



057850

CNRS ÉDITIONS

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



- Quatrième partie -
L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

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

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

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

- Sixième partie -

ENTRE SOURCES ET USAGES : STOCKAGE ET VECTEURS D'ÉNERGIE

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

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 Ciais</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 ExternE 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

L'énergie à découvert

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 stockage, 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*

39 € prix valable en France
ISBN : 978-2-271-07678-6

