

Énergie, électricité et nucléaire



Gilbert NAUDET et Paul REUSS

GÉNIE ATOMIQUE

Énergie, électricité et nucléaire

Gilbert Naudet
et
Paul Reuss



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

ISBN : 978-2-7598-0040-7

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 2008

Introduction à la collection « Génie Atomique »

Au sein du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) est un établissement d'enseignement supérieur sous la tutelle du ministère de l'Éducation nationale et du ministère de l'Industrie. La mission de l'INSTN est de contribuer à la diffusion des savoir-faire du CEA au travers d'enseignements spécialisés et de formations continues, tant à l'échelon national, qu'aux plans européen et international.

Cette mission reste centrée sur le nucléaire, avec notamment l'organisation d'une formation d'ingénieur en « Génie Atomique ». Fort de l'intérêt que porte le CEA au développement de ses collaborations avec les universités et les écoles d'ingénieurs, l'INSTN a développé des liens avec des établissements d'enseignement supérieur aboutissant à l'organisation, en co-habilitation, de plus d'une vingtaine de Masters. À ces formations s'ajoutent les enseignements des disciplines de santé : les spécialisations en médecine nucléaire et en radiopharmacie ainsi qu'une formation destinée aux physiciens d'hôpitaux.

La formation continue constitue un autre volet important des activités de l'INSTN, lequel s'appuie aussi sur les compétences développées au sein du CEA et chez ses partenaires industriels.

Dispensé dès 1954 au CEA Saclay où ont été bâties les premières piles expérimentales, la formation en « Génie Atomique » (GA) l'est également depuis 1976 à Cadarache où a été développée la filière des réacteurs à neutrons rapides. Depuis 1958 le GA est enseigné à l'École des applications militaires de l'énergie atomique (EAMEA) sous la responsabilité de l'INSTN.

Depuis sa création, l'INSTN a diplômé plus de 4 000 ingénieurs que l'on retrouve aujourd'hui dans les grands groupes ou organismes du secteur nucléaire français : CEA, EDF, AREVA, Marine nationale. De très nombreux étudiants étrangers provenant de différents pays ont également suivi cette formation.

Cette spécialisation s'adresse à deux catégories d'étudiants : civils et militaires. Les étudiants civils occuperont des postes d'ingénieurs d'études ou d'exploitation dans les réacteurs nucléaires, électrogènes ou de recherches, ainsi que dans les installations du cycle du combustible. Ils pourront évoluer vers des postes d'experts dans l'analyse du risque nucléaire et de l'évaluation de son impact environnemental. La formation de certains officiers des sous-marins et porte-avions nucléaires français est dispensée par l'EAMEA.

Le corps enseignant est formé par des chercheurs du CEA, des experts de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), des ingénieurs de l'industrie (EDF, AREVA. . .) Les principales matières sont : la physique nucléaire et la neutronique, la thermohydrau-

lique, les matériaux nucléaires, la mécanique, la protection radiologique, l'instrumentation nucléaire, le fonctionnement et la sûreté des réacteurs à eau sous pression (REP), les filières et le cycle du combustible nucléaire. Ces enseignements dispensés sur une durée de six mois sont suivis d'un projet de fin d'étude, véritable prolongement de la formation réalisé à partir d'un cas industriel concret, se déroulent dans les centres de recherches du CEA, des groupes industriels (EDF, AREVA) ou à l'étranger (États-Unis, Canada, Royaume-Uni. . .) La spécificité de cette formation repose sur la large place consacrée aux enseignements pratiques réalisés sur les installations du CEA (réacteur ISIS, simulateurs de REP : SIREP et SIPACT, laboratoires de radiochimie, etc.)

Aujourd'hui, en pleine maturité de l'industrie nucléaire, le diplôme d'ingénieur en « Génie Atomique » reste sans équivalent dans le système éducatif français et affirme sa vocation : former des ingénieurs qui auront une vision globale et approfondie des sciences et techniques mises en œuvre dans chaque phase de la vie des installations nucléaires, depuis leur conception et leur construction jusqu'à leur exploitation puis leur démantèlement.

L'INSTN s'est engagé à publier l'ensemble des supports de cours dans une collection d'ouvrages destinés à devenir des outils de travail pour les étudiants en formation et à faire connaître le contenu de cet enseignement dans les établissements d'enseignement supérieur, français et européens. Édités par EDP Sciences, acteur particulièrement actif et compétent dans la diffusion du savoir scientifique, ces ouvrages sont également destinés à dépasser le cadre de l'enseignement pour constituer des outils indispensables aux ingénieurs et techniciens du secteur industriel.

Joseph Safieh
Responsable général
du cours de Génie Atomique

Auteurs

Paul Reuss est ancien élève de l'École polytechnique et docteur ès sciences physiques. Il a mené toute sa carrière au Commissariat à l'énergie atomique à Saclay et à Fontenay-aux-Roses, se partageant entre les activités de recherche et développement, l'enseignement et la formation. Ses activités de recherche ont porté sur l'amélioration, la validation et la qualification des codes de calcul pour ordinateur utilisés par les ingénieurs pour la conception et le suivi des cœurs des centrales nucléaires, notamment CORECRAF (réacteurs à uranium naturel et à graphite) et APOLLO (réacteurs de tous types et, spécialement, réacteurs à eau). Après avoir suivi le DEA de Physique des réacteurs nucléaires, Paul Reuss est rapidement intervenu comme chargé de cours, puis comme professeur responsable de ce DEA. Il a aussi animé de nombreux autres enseignements. Il est aujourd'hui le professeur coordinateur de l'enseignement de neutronique au *Génie atomique*. Il a également suivi les travaux d'une vingtaine de doctorants et a participé à plus de cent jurys de thèse.

Gilbert Naudet, ingénieur de l'École centrale des arts et manufactures, est ancien chef du service des études économiques au Commissariat à l'énergie atomique, où il est entré comme ingénieur à la section de physique et expérimentation au service des grandes piles de Saclay. Passé ensuite au service des études économiques, il a été mis à disposition à la Délégation à l'Énergie du ministère de l'Industrie à l'époque du lancement du programme nucléaire français, puis pendant six ans à Sofratome, filiale d'EDF et du CEA, où il a dirigé plusieurs études de faisabilité de centrales nucléaires dans certains pays étrangers. Il a été ensuite assistant du Directeur des applications industrielles nucléaires avant de revenir au service des études économiques. Il a assuré depuis près de trente ans des cours et des conférences sur l'énergie nucléaire à l'Institut des sciences et techniques nucléaires, à l'Institut français du pétrole, à l'Université Paris VI, ainsi qu'à l'étranger dans le cadre des cours régionaux organisés par l'AIEA, et plus récemment au Département énergie de l'Asian Institute of Technology en Thaïlande.

Remerciements

Les auteurs tiennent à adresser leurs chaleureux remerciements à Yves -Chelet qui a été l'initiateur de ce projet de livre et à Bernard Wiesenfeld qui a été associé à son élaboration et dont les suggestions aux différentes étapes du projet leur ont été précieuses.

G.N. et P.R.
Mai 2008

Table de matières

Partie I.	Qu'est-ce que l'énergie ?	1
Chapitre 1.	L'émergence du concept d'énergie	3
Chapitre 2.	Notion classique d'énergie	7
2.1.	Travail et énergie	7
2.2.	Énergie libre et énergie stockée	8
2.3.	Les formes d'énergie libre	8
2.4.	Les principales formes d'énergie stockée	9
2.5.	Qu'est-ce que la chaleur ?	10
2.6.	Qu'est-ce que le rayonnement ?	11
2.7.	Qu'est-ce que l'électricité ?	12
Chapitre 3.	Notion d'énergie dans la physique moderne	13
3.1.	Les quatre interactions fondamentales	14
3.2.	L'organisation de la matière	14
3.3.	L'antimatière	16
Chapitre 4.	Transformations de l'énergie	17
4.1.	Transformations des formes d'énergie libre	17
4.2.	Libération de l'énergie stockée	19
4.3.	Stockage de l'énergie	19
4.4.	Quelques ordres de grandeur	20
4.5.	Sources d'énergie	21
Chapitre 5.	Conservation de l'énergie (premier principe de la thermodynamique)	25
5.1.	La thermodynamique	25
5.2.	Le premier principe de la thermodynamique	25
5.3.	Quelques notions résultant du premier principe	26
Chapitre 6.	Irréversibilité des transformations de l'énergie (deuxième principe de la thermodynamique)	29
6.1.	Caractère général d'une machine thermique	29
6.2.	Notion de température absolue	30
6.3.	Notion d'entropie	31
Chapitre 7.	Grandeurs et unités utilisées dans le domaine de l'énergétique	33
7.1.	Généralités	33
7.2.	Notation des multiples et sous-multiples	34
7.3.	Unités de base du système international	35

7.4.	Principales unités	35
7.5.	Quelques constantes physiques utiles en énergétique	35
Partie II.	Production et consommation d'énergie	37
Chapitre 8.	Système énergétique	39
8.1.	Énergies primaires	39
8.2.	Énergies secondaires	40
8.3.	Énergies finales	43
8.4.	Énergies utiles	44
8.5.	Chaîne énergétique	45
Chapitre 9.	Comptabilité énergétique.	49
9.1.	Équivalences énergétiques.	49
9.2.	Systèmes d'équivalences énergétiques	51
9.3.	Bilans énergétiques	52
Chapitre 10.	Ressources énergétiques : réserves et potentialités	57
10.1.	Critères de classification des réserves épuisables	57
10.2.	Classification des réserves et ressources d'hydrocarbures	58
10.3.	Classification des réserves et ressources d'uranium	59
10.4.	Réserves de combustibles minéraux solides.	60
10.5.	Réserves de pétrole	61
10.6.	Réserves de gaz naturel	62
10.7.	Réserves et ressources d'uranium.	63
10.8.	Comparaison des réserves prouvées des énergies épuisables	65
10.9.	Inventaire des sources d'énergies renouvelables	66
10.10.	Potentiel réalisable des énergies renouvelables	68
Chapitre 11.	Production des énergies primaires	71
11.1.	Production de combustibles minéraux solides	71
11.2.	Production de pétrole	72
11.3.	Production de gaz naturel	74
11.4.	Production d'uranium naturel	76
11.5.	Production d'électricité d'origine nucléaire	77
11.6.	Production des énergies renouvelables	78
11.7.	Bilan mondial des productions d'énergies primaires	80
11.8.	Évolution de la production d'énergies primaires en France.	82
Chapitre 12.	Transport et stockage des énergies primaires	83
12.1.	Charbon	83
12.2.	Pétrole	84
12.3.	Gaz naturel	86
12.4.	Uranium naturel	88
Chapitre 13.	Consommation de l'énergie.	89
13.1.	Approvisionnement énergétique et bilan de conversion	89

13.2.	Consommation finale d'énergie	91
13.3.	Évolution passée de la consommation mondiale d'énergie	93
Chapitre 14.	Économies d'énergie	95
14.1.	Raisons incitatives	95
14.2.	Moyens mis en œuvre	95
14.3.	Limitations.	96
14.4.	Économies d'énergie réalisées	97
Chapitre 15.	Marchés et prix de l'énergie.	99
15.1.	Aspects généraux.	99
15.2.	Notions élémentaires et terminologie	101
15.3.	Marché du pétrole	102
15.4.	Marché du gaz naturel.	106
15.5.	Marché du charbon	110
15.6.	Marché de l'uranium	113
Chapitre 16.	Indicateurs énergétiques	117
16.1.	Consommation d'énergie par habitant	117
16.2.	Élasticité énergétique.	118
16.3.	Intensité énergétique	119
16.4.	Indice d'efficacité énergétique.	121
16.5.	Taux d'indépendance énergétique	122
16.6.	Facture énergétique	123
16.7.	Intensité CO ₂	124

Partie III. Énergie électrique 125

Chapitre 17.	Spécificité de l'électricité et système électrique	127
17.1.	Avantages de l'électricité	127
17.2.	Système électrique.	128
17.3.	Ajustement de la puissance à la demande	133
Chapitre 18.	Réseaux électriques	137
18.1.	Catégories de réseaux et principes généraux	137
18.2.	Structure des réseaux.	138
18.3.	Réglage et protection des réseaux	139
18.4.	Conduite du système électrique.	142
18.5.	Interconnexions électriques internationales	144
Chapitre 19.	Production d'électricité	147
19.1.	Modes de production d'électricité	147
19.2.	Puissance électrique installée dans le monde	151
19.3.	Production totale d'électricité dans le monde	151
19.4.	Production d'électricité d'origine nucléaire dans le monde.	154
19.5.	Puissance et production électrique en France	154
Chapitre 20.	Stockage de l'électricité.	157
20.1.	Procédés et fonctions du stockage de l'électricité	157
20.2.	Technologies du stockage de l'électricité.	158

Chapitre 21. Demande et consommation d'électricité	163
21.1. Usages de l'électricité	163
21.2. Bilan électrique	164
21.3. Indicateurs de la consommation d'électricité.	164
21.4. Analyse sectorielle de la consommation d'électricité	166
21.5. Prévision de la demande d'électricité	167
Chapitre 22. Économie de la production d'électricité.	169
22.1. Méthode d'évaluation économique	169
22.2. Données économiques	170
22.3. Coûts externes	172
22.4. Compétitivité	173
Chapitre 23. Prix et marché de l'électricité.	177
23.1. Secteur électrique avant déréglementation.	177
23.2. Mutations du secteur électrique.	179
23.3. Incertitudes sur les prix et les investissements du secteur électrique	181
Partie IV. Principes physiques de l'énergie nucléaire	185
Chapitre 24. Structure et énergie de liaison des noyaux atomiques	187
24.1. Particules élémentaires et interactions fondamentales	187
24.2. Structure des atomes et des noyaux	187
24.3. Stabilité et énergie de liaison des noyaux.	190
24.4. Molécules, cristaux et matière à l'échelle macroscopique.	193
Chapitre 25. Radioactivité et réactions nucléaires	195
25.1. Qu'est-ce que la radioactivité ?	195
25.2. Principaux modes de décroissance radioactive	196
25.3. Loi de la radioactivité	198
25.4. Activité radioactive	199
25.5. Quelques exemples de noyaux radioactifs.	200
25.6. Réactions nucléaires	204
25.7. Exemples de réactions nucléaires	205
Chapitre 26. Réactions nucléaires utilisées en énergétique.	207
26.1. Recherche de réactions nucléaires énergétiques	207
26.2. Principe de l'énergie de fission	208
26.3. Les applications de la fission	210
26.4. Produits et sous-produits de la fission	211
26.5. Principe de l'énergie de fusion	214
26.6. Quelques réactions de fusion envisageables	214
26.7. Principe de l'énergie thermonucléaire	217
26.8. Deux voies pour une production d'énergie thermonucléaire.	217
26.9. La voie de la fusion magnétique	218

	26.10. La voie de la fusion inertielle	221
	26.11. Les réactions de spallation	222
	26.12. Réacteurs hybrides	222
Chapitre 27.	Éléments de physique des réacteurs à fission	225
	27.1. Facteur de multiplication	225
	27.2. Comment atteindre le facteur de multiplication souhaité ?	226
	27.3. Réacteurs à neutrons rapides et réacteurs à neutrons thermiques	228
	27.4. Le risque d'absorption résonnante des neutrons	229
	27.5. Les principaux modérateurs	230
	27.6. Les principaux caloporteurs	231
	27.7. Les atouts des réacteurs à neutrons rapides	232
	27.8. Cinétique des réacteurs	233
	27.9. Effets de température	234
	27.10. Empoisonnement par les produits de fission	236
	27.11. Évolution des noyaux lourds et de la réactivité	236
	27.12. Pilotage des réacteurs	238
	27.13. Gestion des réacteurs	240
Partie V.	Techniques nucléaires	243
Chapitre 28.	Aperçu historique	245
	28.1. Les premières « piles atomiques »	245
	28.2. Les réacteurs d'Oklo	245
	28.3. Les années de guerre	246
	28.4. La pile de Fermi	247
	28.5. Le développement de l'énergie nucléaire	248
	28.6. La situation actuelle	249
Chapitre 29.	Les principales filières actuelles	251
	29.1. Généralités	251
	29.2. Réacteurs à eau sous pression	255
	29.3. Réacteurs navals	263
	29.4. Réacteurs à eau bouillante	266
	29.5. Réacteurs à eau lourde	271
	29.6. Réacteurs à graphite et uranium naturel (UNGG)	274
	29.7. Réacteurs RBMK	278
	29.8. Réacteurs HTR	280
	29.9. Réacteurs à neutrons rapides	284
Chapitre 30.	Perspectives	291
	30.1. Introduction	291
	30.2. Le réacteur EPR	291
	30.3. Recyclage du plutonium et projet APA	292
	30.4. L'amplificateur d'énergie	294
	30.5. Le forum Génération IV	294
	30.6. Conclusion	297

Partie VI. Cycle du combustible nucléaire.	299
Chapitre 31. Généralités	301
31.1. Le combustible nucléaire.	301
31.2. Pourquoi parler de « cycle » ?	302
31.3. La problématique du plutonium	304
31.4. Les besoins français en ce qui concerne le cycle du combustible.	305
Chapitre 32. Extraction de l'uranium	309
Chapitre 33. Conversion, enrichissement, fabrication du combustible	311
33.1. Conversion en hexafluorure et enrichissement.	311
33.2. Conversion en oxyde et fabrication	313
33.3. Le recyclage civil des matières militaires	313
33.4. Annexe : définition du travail de séparation isotopique	316
Chapitre 34. Aval du cycle.	321
34.1. Entreposage pour refroidissement	321
34.2. Retraitement	322
34.3. Conclusions.	323
Chapitre 35. Recyclage du plutonium dans les réacteurs à eau	325
35.1. Masses et composition isotopique du plutonium	325
35.2. Comment recycler le plutonium ?	326
35.3. Peut-on recycler plusieurs fois le plutonium ?	327
 Partie VII. Aspects sanitaires et environnementaux de l'énergie nucléaire	 329
Chapitre 36. Effets des rayonnements ionisants	331
36.1. Définition des rayonnements ionisants.	331
36.2. Sources de rayonnements liés à l'énergie nucléaire	331
36.3. Interactions des rayonnements avec la matière	332
36.4. Effets des rayonnements sur la matière inerte	333
36.5. Effets des rayonnements sur la matière vivante.	334
36.6. Grandeurs et unités de la radioprotection	337
Chapitre 37. Éléments de radioprotection	343
37.1. Principes et réglementation en matière de radioprotection	343
37.2. Radioprotection opérationnelle pour les travailleurs	345
37.3. Radioprotection opérationnelle pour le public.	347
37.4. Transport des matières radioactives et gestion des déchets	348
Chapitre 38. Effets sur l'environnement de l'énergie nucléaire	349
38.1. Effluents radioactifs	349
38.2. Pollution thermique.	351
38.3. Gaz à effet de serre	352
Chapitre 39. Problématique des déchets nucléaires	353
39.1. Notion de radiotoxicité	353
39.2. Principaux types de déchets nucléaires	354

39.3. Gestion actuelle des déchets nucléaires	355
39.4. Axes de recherche et perspectives	358
Chapitre 40. Risques spécifiques à l'énergie nucléaire	365
40.1. Types d'installations nucléaires et risques associés.	365
40.2. Le risque de criticité (hors réacteurs)	366
40.3. Le risque d'accident de réacteur	367
40.4. Principes de sûreté nucléaire	370
40.5. Analyse de la sûreté nucléaire	373
40.6. Organisation de la sûreté nucléaire	374
40.7. Sécurité physique : sécurité des matières, installations et transports	375
Partie VIII. Conclusions	377
Conclusions	379
Partie IX. Annexes	383
A1. Principales unités	385
A2. Quelques constantes physiques utiles en énergétique	399
A3. Détail des exemples numériques de la partie I	401
Index	413
Bibliographie	415

Partie I

QU'EST-CE QUE L'ÉNERGIE ?

1

L'émergence du concept d'énergie

Si les notions de force et de mouvement – intuitives ou directement observables – sont sans doute aussi anciennes que la pensée humaine, le concept d'énergie, en revanche, ne s'est affiné que progressivement ; ce n'est qu'au ^{xix}^e siècle avec la théorie de la thermodynamique et au ^{xx}^e siècle avec la théorie de la relativité, la physique quantique et le modèle standard de la physique des particules qu'a pris forme la notion d'énergie telle que l'appréhende le physicien d'aujourd'hui. Mais la formalisation du concept d'énergie n'est pas forcément indispensable pour comprendre une partie de ses applications.

Ce qui est frappant, en effet, quand on parcourt un ouvrage d'histoire des sciences et des techniques, c'est de constater que l'application précède souvent la théorie et, par conséquent, ne la nécessite pas forcément. C'est le cas de l'énergie. Dès l'Antiquité, bien avant que le concept précis d'énergie ait été façonné, l'homme a su utiliser l'énergie et construire des machines fort ingénieuses : levier, poulies et treuils ; chars, navires et cerfs-volants ; machines de guerre (arcs, catapultes, etc.) ; norias, moulins à eau, puis à vent ... Les exemples sont nombreux d'une maîtrise pratique de l'énergie avant une maîtrise conceptuelle.

Toutefois, s'il est possible de faire l'économie d'une approche théorique pour ces applications assez intuitives, cela est moins vrai lorsqu'il s'agit de machines qui ne sont plus directement dérivées de l'observation quotidienne : si la machine à vapeur à piston conçue par Denis Papin (1687) ou même les améliorations apportées par James Watt, vers la fin du ^{xviii}^e siècle, à la machine de Thomas Newcomen (1712) ont fait plus appel au sens pratique qu'à la théorie, il est clair que l'essor de ces machines, observé au ^{xix}^e siècle, et leur optimisation, n'auraient pas été tels sans les travaux de Sadi Carnot, Émile Clapeyron, Rudolf Clausius, lord Kelvin, et bien d'autres. De même, la « fée électricité » ne nous aurait pas apporté tant de « bienfaits » si elle n'avait été accompagnée dès son origine par de nombreux travaux théoriques.

L'énergie du ^{xx}^e siècle, l'énergie nucléaire, ne se conçoit pas, elle, sans un préalable théorique : ce préalable a dû être élaboré à partir d'expériences cruciales, telle celle de Henri Becquerel en 1896, avant que cette énergie soit imaginée. Sans cette découverte de la radioactivité, sans la théorie de la relativité, sans la compréhension de la structure des atomes et de leurs noyaux, sans la découverte du neutron et de la fission, elle n'aurait jamais pu être imaginée.

Bibliographie

Partie I : Qu'est-ce que l'énergie ?

BACHER P., *L'énergie en 21 questions*, Odile Jacob, Paris, 2007.

Encyclopaedia Universalis.

KANE J., STERHEIM M., *Physique*, InterEditions, Paris, 1986.

Partie II : Production et consommation d'énergie

Agence internationale de l'énergie (AIE) : *30 Years of Energy Use in IEA Countries*, OCDE, Paris, 2004.

BATAILLE C., BIRRAUX C. : *Les nouvelles technologies de l'énergie et de séquestration du dioxyde de carbone, aspects scientifiques et techniques*, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Paris, 2006.

CLEVELAND C.J., *Encyclopedia of Energy*, Elsevier Inc., New-York, 2004.

Observatoire de l'énergie, *Les bilans de l'énergie : 1970-2004*, DGEMP, Paris, 2005.

PERCEBOIS J., *Économie de l'énergie*, Economica, Paris, 1989.

ROJHEY A., *Le gaz naturel – production, traitement, transport*, Technip, Paris, 1994.

Partie III : L'énergie électrique

Agence de l'énergie nucléaire (AEN), *Projected Costs of Generating Electricity*, OCDE, Paris, 2005.

BERTEL E., NAUDET G., *L'économie de l'énergie nucléaire*, EDP Sciences, Les Ulis, 2004.

Direction de la demande et des marchés énergétiques (DIDEME), *Coûts de référence de la production électrique*, DGEMP, Paris, 2003.

ELECNUC, *Les centrales nucléaires dans le monde*, CEA, Paris, 2005.

Génie électrique, Vol. D8, *Réseaux électriques et applications*, Techniques de l'ingénieur, Paris, 2005.