

# Table des matières

---

<b>Partie I.</b>	<b>Qu'est-ce que l'énergie ?</b>	<b>1</b>
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
<b>Partie II.</b>	<b>Production et consommation d'énergie . . . . .</b>	<b>37</b>
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 <sub>2</sub> . . . . .	124
<b>Partie III.</b>	<b>Énergie électrique . . . . .</b>	<b>125</b>
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
<b>Partie IV. Principes physiques de l'énergie nucléaire . . . . .</b>	<b>185</b>
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
<b>Partie V.</b>	<b>Techniques nucléaires . . . . .</b>	<b>243</b>
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

<b>Partie VI. Cycle du combustible nucléaire. . . . .</b>	<b>299</b>
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
 <b>Partie VII. Aspects sanitaires et environnementaux de l'énergie nucléaire . . . . .</b>	 <b>329</b>
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
<b>Partie VIII. Conclusions . . . . .</b>	<b>377</b>
Conclusions . . . . .	379
<b>Partie IX. Annexes . . . . .</b>	<b>383</b>
A1. Principales unités. . . . .	385
A2. Quelques constantes physiques utiles en énergétique . . . . .	399
A3. Détail des exemples numériques de la partie I . . . . .	401
<b>Index . . . . .</b>	<b>413</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>415</b>