

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	7
---------------	---

PREMIÈRE PARTIE - PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE

1 - INTRODUCTION	11
------------------------	----

2 - LES MULTIPLES VISAGES DE L'ÉNERGIE.....	13
---	----

Roger BALIAN

2.1. <i>Conséquences énergétiques des principes fondamentaux</i>	14
--	----

2.1.1. Premier principe	14
-------------------------------	----

2.1.2. Deuxième principe	17
--------------------------------	----

2.1.3. Principes de la thermodynamique hors équilibre	22
---	----

2.1.4. Hiérarchie des énergies	25
--------------------------------------	----

2.2. <i>Comparaisons</i>	29
--------------------------------	----

2.2.1. Concentration	29
----------------------------	----

2.2.2. Dégradation	31
--------------------------	----

2.2.3. Stockage	33
-----------------------	----

<i>Annexe - L'élaboration du concept d'énergie</i>	34
--	----

Energie mécanique.....	35
------------------------	----

Premières études sur la chaleur	36
---------------------------------------	----

Naissance de la thermodynamique	37
---------------------------------------	----

La thermodynamique des processus irréversibles	39
--	----

L'apport de la physique statistique	40
---	----

L'apport de la mécanique quantique, de la relativité et de la physique des particules	42
--	----

<i>Références</i>	46
-------------------------	----

3 - LA CONSOMMATION DES SOURCES D'ÉNERGIE : <i>UTILISATIONS FINALES, EFFICACITÉ ET PRODUCTIVITÉ</i>	47
--	----

Jean-Marie MARTIN-AMOUROUX

3.1. <i>Les chaînes de conversion : des sources d'énergie primaires à la satisfaction des services énergétiques</i>	49
---	----

3.1.1. De la consommation primaire à la consommation finale.....	50
--	----

3.1.2. De la consommation finale aux services énergétiques	52
--	----

3.1.3. Efficacité énergétique et exergétique, constatée et potentielle	53
--	----

3.1.4. Le confort thermique.....	57
----------------------------------	----

3.1.5.	La fabrication des matériaux	59
3.1.6.	Le transport des hommes et des marchandises	62
3.1.7.	Force motrice fixe, éclairage, réfrigération et traitement de l'information.....	64
3.2.	De l'efficacité à la productivité de l'énergie	67
3.2.1.	La signification de l'intensité énergétique.....	67
3.2.2.	L'évolution passée de l'intensité énergétique	69
3.3.	L'influence de l'intensité énergétique sur l'évolution de la consommation mondiale d'énergie au cours des prochaines décennies	72
3.3.1.	Trois scénarios de consommation à l'horizon 2050.....	72
3.3.2.	Croissances démographique et économique.....	74
3.3.3.	L'élévation de l'efficacité énergétique	74
3.3.4.	Vers une dématérialisation du PIB ?.....	75
3.4.	Conclusion.....	76
	Annexe - Evolution de la consommation mondiale 1800-2000 des sources d'énergie (en Mtep)	77
	Références	78

4 - LES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION DES STRUCTURES ÉNERGÉTIQUES JUSQU'EN 2050 81

Hervé NIFENECKER

4.1.	Introduction.....	81
4.2.	Les mesures de l'énergie.....	82
4.2.1.	Energie finale	84
4.2.2.	Energie primaire	84
4.3.	Evolution de la consommation depuis 1973.....	86
4.4.	Evolution de la production depuis 1973.....	87
4.5.	Evolutions démographiques.....	88
4.6.	Les scénarios du futur	93
4.6.1.	Evolutions démographiques.....	93
4.6.2.	Estimation des Produits Intérieurs Bruts.....	99
4.6.3.	Les intensités énergétiques.....	100
4.6.4.	L'intensité d'émission de gaz carbonique	102
4.6.5.	Les sous-scénarios de l'IIASA	103
4.6.6.	Critique des scénarios de l'IIASA	105
4.6.7.	Variantes « nucléaires » des scénarios IIASA	106
4.7.	Conclusion.....	108
	Annexe I - Tableau officiel des contenus énergétiques	109
	Annexe II - Un exemple de modèle démographique.....	109
	Références	111

DEUXIÈME PARTIE - PRODUCTION D'ÉNERGIE ET CLIMAT

5 - LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE : PROBLÉMATIQUE GÉNÉRALE	115
<i>Jean-Louis BOBIN</i>	
5.1. <i>Quand l'histoire est au congélateur.....</i>	116
5.1.1. Histoire des températures	116
5.1.2. Histoire des concentrations de gaz à effet de serre	119
5.2. <i>Le cycle du carbone</i>	121
5.3. <i>Gaz à effet de serre d'origine anthropique.....</i>	123
5.4. <i>Sur la bonne voie mais... ..</i>	127
5.5. <i>La menace d'un réchauffement global.....</i>	129
5.6. <i>Comment réagir ?</i>	134
<i>Références</i>	137
6 - LA MODÉLISATION DU SYSTÈME CLIMATIQUE ET DE SA RÉPONSE À UNE AUGMENTATION DE L'EFFET DE SERRE.....	139
<i>Laurent LI</i>	
6.1. <i>Définition de l'effet de serre.....</i>	140
6.2. <i>Variation du climat au cours du temps géologique</i>	143
6.3. <i>Perturbation anthropique sur l'effet de serre.....</i>	145
6.4. <i>Modélisation du climat et projection vers le futur</i>	147
6.5. <i>Conclusion</i>	150
<i>Bibliographie.....</i>	151

TROISIÈME PARTIE - LES COMBUSTIBLES FOSSILES

7 - QUEL AVENIR POUR LES COMBUSTIBLES FOSSILES ?	155
<i>Bernard TISSOT</i>	
7.1. <i>Le rôle prédominant des combustibles fossiles dans nos sources d'énergie primaire.....</i>	156
7.2. <i>Un avenir incertain</i>	157
7.3. <i>La recherche scientifique permettra-t-elle de reculer ces limites ?.....</i>	158
7.4. <i>Accroissement des réserves.....</i>	158
7.5. <i>Amélioration du taux de récupération des gisements</i>	160
7.6. <i>La mobilisation des ressources non-conventionnelles de pétrole.....</i>	163
7.7. <i>Les ressources effectivement mobilisables.....</i>	165
7.8. <i>Conclusion.....</i>	166
<i>Références</i>	167

8 - L'ÉTAT DES RÉSERVES DES COMBUSTIBLES FOSSILES	169
<i>Jean LAHERRÈRE</i>	
8.1. Unités	170
8.2. Incertitude sur les réserves	171
8.3. Fiabilité des réserves publiées	174
8.4. Modélisation de la production future	175
8.4.1. Utilisation uniquement des données de production annuelle	175
8.4.2. Utilisation des données de production et de découverte annuelles	176
8.5. Production future des combustibles fossiles	179
8.5.1. Le charbon	179
8.5.2. Combustibles fossiles : charbon + pétrole + gaz	183
8.6. Comparaison des productions mondiales énergétiques par source	184
8.7. Préviation de consommation mondiale d'énergie par habitant	189
8.8. R/P = réserves restantes/production annuelle	191
8.9. Hydrocarbures non-conventionnels	192
8.10. Impact de la technologie	198
8.11. Impact des prix	201
8.12. Croissance des réserves	202
8.13. Conclusion	203
Bibliographie	203
9 - LE CHARBON	205
<i>Jean TEISSIÉ, Diego DE BOURGUES & François BAUTIN</i>	
9.1. Introduction	205
9.2. Origine du charbon	206
9.3. Composition	207
9.3.1. Les minéraux	207
9.3.2. La matière organique	207
9.3.3. L'eau	208
9.3.4. Les volatiles	208
9.4. Pouvoir calorifique	208
9.5. Classification	209
9.6. Ressources	210
9.7. Réserves	211
9.8. Production	214
9.8.1. Le marché international	216
9.9. Consommation	216
9.9.1. Prix de revient	219
9.9.2. Prix de vente	221
9.10. Sécurité	224
9.10.1. Le grisou	224

9.10.2. Silicose.....	226
9.11. Les rejets dans l'environnement.....	226
9.11.1. Les rejets solides.....	226
9.11.2. Les rejets gazeux : méthane, CO ₂ , NO _x et SO ₂	227
9.12. Les centrales thermiques à charbon.....	230
9.12.1. Les différentes technologies.....	231
9.12.2. Conclusion sur les centrales.....	234
9.13. Solutions alternatives.....	235
Bibliographie.....	236
10 - LE PRINCIPE DU STOCKAGE DE GAZ EN CAVITÉS CREUSÉES DANS LE SEL.....	237
<i>Gérard DURUP</i>	
10.1. Le halite et les formations salifères.....	238
10.1.1. Généralités géologiques.....	238
10.1.2. Caractéristiques spécifiques pour le stockage.....	238
10.2. Le creusement des cavités.....	239
10.2.1. Le forage et les essais d'étanchéité.....	239
10.2.2. La dissolution.....	239
10.3. Mise en gaz et exploitation du stockage.....	241
10.3.1. La complétion.....	241
10.3.2. La première mise en gaz.....	241
10.3.3. Principes d'exploitation.....	242
10.4. Performances des cavités.....	243
10.4.1. Equation d'état du gaz.....	243
10.4.2. Thermodynamique de l'exploitation par compression/détente.....	243
10.4.3. Stock de gaz en cavité (S).....	244
10.4.4. Débit d'émission (Q).....	245
10.4.5. Grandeurs principales de la performance : P, S et Q.....	246
10.5. Stabilité et dimensionnement des cavités.....	246
10.5.1. Rupture de l'équilibre naturel.....	246
10.5.2. La loi rhéologique du sel.....	247
10.5.3. Les études de stabilité.....	248
10.6. Etapes et coût de la réalisation d'un stockage de gaz dans le sel.....	249
10.6.1. Equipements généraux pour le lessivage.....	249
10.6.2. Démarches administratives.....	249
10.6.3. Dépenses spécifiques au creusement d'une cavité.....	249
10.6.4. Dépenses d'équipement gaz.....	250
10.6.5. Indicateur économique d'investissement.....	250
10.7. Bref historique et place du stockage de gaz naturel	
en cavités creusées dans le sel.....	250
Bibliographie.....	251

11 - LES EFFETS SANITAIRES DES COMBUSTIBLES FOSSILES	253
<i>Hervé NIFENECKER</i>	
11.1. Les guerres de l'énergie	253
11.2. Risques sanitaires comportementaux et environnementaux	255
11.3. Les risques de production, de transport et de distribution	264
11.3.1. La production et le transport du pétrole et du gaz.....	264
11.3.2. L'extraction du charbon.....	266
11.3.3. Les accidents domestiques	266
11.4. Risques dus à la pollution atmosphérique	267
11.4.1. Les composants de la pollution atmosphérique	268
11.5. Effets sanitaires de la pollution atmosphérique.....	271
11.5.1. Les troubles aigus	272
11.5.2. Les troubles chroniques.....	273

QUATRIÈME PARTIE - LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

12 - L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE	279
<i>Pierre BACHER & Bernard TARDIEU</i>	
12.1. Introduction.....	279
12.2. Les différents types d'ouvrages hydrauliques	280
12.2.1. Les bassins versants et le stockage naturel de l'eau	280
12.2.2. Les différents types d'aménagements hydrauliques	281
12.3. La grande hydraulique.....	283
12.3.1. Situation en 2000.....	283
12.3.2. Avantages et inconvénients.....	283
12.3.3. Grande hydraulique et risques industriels	285
12.3.4. Grande hydraulique et réseau de transport d'électricité.....	286
12.3.5. Economie	287
12.3.6. Potentiel et perspectives de développement	288
12.4. La petite hydraulique	288
12.4.1. Situation en 2000.....	289
12.4.2. Avantages et inconvénients.....	290
12.4.3. Petite hydraulique : une production décentralisée.....	290
12.4.4. Perspectives de développement	291
12.5. Conclusion.....	293
Bibliographie.....	294
13 - LA VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DE LA BIOMASSE	295
<i>Gérard CLAUDET</i>	
13.1. Les enjeux.....	296
13.2. Le potentiel de la biomasse	296
13.3. Les filières de valorisation énergétique de la biomasse.....	300
13.3.1. La combustion, source de chaleur ou de cogénération.....	301

13.3.2. La méthanisation, source de biogaz	304
13.3.3. Les biocarburants	307
13.3.4. La filière thermochimique de gazéification.....	310
13.4. Conclusion.....	316
Références.....	317
14 - LA GÉOTHERMIE.....	319
<i>Daniel MADET</i>	
14.1. Principaux types de ressources géothermiques	320
14.2. Aperçu des techniques d'exploitation.....	321
14.3. La place de l'énergie géothermique.....	321
14.3.1. Données économiques	321
14.3.2. Impact environnemental	322
14.3.3. Situation actuelle dans le monde.....	322
14.3.4. Perspectives d'évolution	322
14.4. Eléments de méthode pour des comparaisons et applications.....	322
Bibliographie.....	324
15 - LA PHYSIQUE DES ÉOLIENNES	325
<i>Hervé NIFENECKER</i>	
15.1. Puissance du vent.....	325
15.1.1. Puissance maximale récupérable, loi de BETZ.....	325
15.2. Physique des pales.....	326
15.2.1. Définition des forces agissant sur les pales.....	326
15.2.2. Cas de la pale en mouvement	328
15.2.3. Condition d'équilibre.....	330
15.2.4. Rendement optimal de pale.....	331
15.2.5. Forme optimale des pales.....	331
15.3. L'éolienne.....	332
15.3.1. De la pale à l'éolienne	332
15.3.2. Choix des caractéristiques d'une éolienne.....	333
15.3.3. Puissances instantanée, nominale et moyenne.....	335
15.3.4. De la puissance du vent à la puissance électrique	336
15.4. Les parcs d'éoliennes.....	338
15.4.1. Disposition des éoliennes d'un parc.....	338
15.4.2. Localisation du parc.....	339
15.5. La gestion des parc d'éoliennes.....	341
16 - LES ASPECTS TECHNICO-ÉCONOMIQUES DU DÉVELOPPEMENT DE L'ÉOLIEN DANS LE CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE FRANÇAIS ET EUROPÉEN	343
<i>Jean-Marc AGATOR</i>	
16.1. La montée en puissance de l'éolien.....	343
16.2. Les défis de l'éolien offshore.....	344
16.3. Les évolutions technologiques majeures.....	345

16.4. L'émergence de l'industrie éolienne française.....	346
16.5. L'avenir de l'éolien en France.....	347
Annexe I - Le marché mondial pourrait être tiré par l'offshore	349
Annexe II - Le coût du programme français	350
17 - LE PHOTOVOLTAÏQUE : LES FILIÈRES, LES MARCHÉS, LES PERSPECTIVES	351
<i>Patrick JOURDE</i>	
17.1. Introduction : l'énergie solaire.....	351
17.2. Le principe et les filières du photovoltaïque	353
17.2.1. L'effet photovoltaïque	353
17.2.2. Les filières.....	354
17.2.3. L'industrie	356
17.2.4. La baisse des prix des modules.....	358
17.2.5. De la cellule au système : les composants et le dimensionnement.....	359
17.2.6. Le stockage	360
17.3. Les applications, les marchés.....	362
17.3.1. L'historique	362
17.3.2. Deux marchés principaux pour des applications très variées	363
17.3.3. Le marché des pays en développement	363
17.3.4. Les toits photovoltaïques	365
17.4. Bilan et perspectives	367
17.4.1. Les points forts du photovoltaïque	367
17.4.2. Les points faibles.....	367
17.4.3. Les marchés potentiels.....	368
17.4.4. Un problème complexe : les mécanismes financiers	368
17.4.5. Perspectives lointaines	369
17.5. Conclusions.....	369
18 - LE SOLAIRE THERMODYNAMIQUE	371
<i>Bruno RIVOIRE</i>	
18.1. Introduction.....	371
18.2. Les aspects techniques.....	373
18.2.1. La concentration	373
18.2.2. La réception du rayonnement.....	380
18.2.3. Le transport et le stockage de la chaleur	385
18.2.4. La transformation thermo-électrique de l'énergie récoltée	389
18.3. Gisement et impact environnemental.....	392
18.4. Le résultat des expériences et les perspectives	393
18.4.1. Une expérience avérée : celle des centrales Luz	394
18.4.2. Une formule prometteuse : celle des centrales à tour à sel fondu.....	395
18.4.3. Un domaine encore à défricher : celui de la filière parabolique.....	397
18.4.4. Perspectives de la recherche.....	398
18.5. Conclusion.....	399
Références	400

CINQUIÈME PARTIE - L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

19 - L'ÉNERGIE DE FISSION	403
<i>Roger BRISOT</i>	
19.1. Introduction.....	403
19.2. Physique de base - Éléments de neutronique.....	404
19.2.1. Noyaux fissiles, noyaux fertiles	404
19.2.2. Réaction en chaîne	405
19.2.3. Éléments de cinétique.....	406
19.2.4. Éléments de sûreté	407
19.3. Les filières existantes.....	408
19.3.1. Les systèmes à neutrons lents.....	408
19.3.2. Les systèmes à neutrons rapides - RNR.....	411
19.4. Les réacteurs dans le monde.....	411
19.5. La gestion du cycle du combustible	412
19.5.1. Production d'uranium	413
19.5.2. Les produits de fission	414
19.5.3. La production d'éléments transuraniens.....	415
19.6. La gestion de l'aval du cycle.....	416
19.6.1. Retraitement du combustible	416
19.6.2. Utilisation des ressources naturelles et gestion des combustibles irradiés.....	416
19.7. Transmutation et incinération.....	417
19.7.1. Transmutation des produits de fission	418
19.7.2. Incinération des actinides.....	418
19.8. Le futur du nucléaire, nouvelles filières, nouveaux combustibles.....	420
19.8.1. Le choix du cycle : uranium-plutonium ou thorium-uranium ?.....	421
19.8.2. Les réacteurs surrégénérateurs à spectre rapide - RNR	422
19.8.3. Les réacteurs surrégénérateurs à spectre thermique - RSF	422
19.8.4. Les systèmes sous-critiques pilotés par accélérateur Réacteurs hybrides.....	424
19.8.5. Comparaison des performances.....	426
19.9. Conclusion.....	427
Références.....	427
20 - LE STOCKAGE DES DÉCHETS NUCLÉAIRES EN SITE PROFOND.....	429
<i>Hervé NIFENECKER & Gérald OUZOUNIAN</i>	
20.1. Modèle de site de stockage souterrain	430
20.2. Principes de la diffusion des radioéléments dans les couches géologiques.....	431
20.2.1. Modèle physique de la diffusion dans la couche d'argile	432
20.2.2. Solution schématique du problème de diffusion à travers la couche d'argile	433
20.2.3. Détermination de la dose délivrée à la population.....	435
20.2.4. Quelques exemples de détermination de doses	436

20.2.5. Exemple de calcul complet de dose à l'exutoire.....	437
20.2.6. Cas d'une intrusion accidentelle.....	439
20.3. Production de chaleur et dimensionnement du site.....	441
20.3.1. Détermination schématique de la distribution de température dans la couche.....	442
20.3.2. Exemples.....	442
20.4. Prise en compte de l'aléa géologique.....	443
20.5. Pourquoi un laboratoire souterrain ?.....	444
20.6. Conclusion.....	445
Références.....	447
21 - LA FUSION CONTRÔLÉE, ESPOIRS ET DÉCONVENUES	449
<i>Jean-Louis BOBIN</i>	
21.1. Introduction.....	449
21.2. Fusion des noyaux légers	450
21.3. La Nature et les décideurs.....	453
21.4. Chaudron magnétique ou micro « big-bang » ?	455
21.5. 30 années de « pensée(s) unique(s) » : is big beautiful ?.....	456
21.6. Succès, certitudes et incertitudes	461
Bibliographie.....	463
22 - LES EFFETS SANITAIRES DES RADIATIONS	465
<i>Roland MASSE</i>	
22.1. Introduction.....	465
22.1.1. Ordres de grandeur	465
22.1.2. Connaissance des effets pathogènes des rayonnements ionisants.....	467
22.2. Conséquences médicales et sanitaires	468
22.2.1. Effets aigus.....	468
22.2.2. Effets retardés : conséquences sanitaires des surexpositions.....	470
22.3. Faibles doses.....	473
22.3.1. Absence d'effets des faibles débits de dose.....	473
22.3.2. Les cancers attribués aux faibles doses résultent d'extrapolations.....	474
22.3.3. Mécanismes d'action, spécificité des faibles doses.....	476
22.4. Accidents d'irradiation, accidents nucléaires.....	481
22.4.1. Accidents	481
22.4.2. Accidents et maladies professionnelles.....	483
22.4.3. Accidents nucléaires : Tchernobyl.....	485
22.5. Impact sanitaire de l'industrie nucléaire	491
Références.....	493

SIXIÈME PARTIE - LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE

23 - LA PRODUCTION ET LE STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUES DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE...	499
<i>Jean-François FAUVARQUE</i>	
23.1. Historique	499
23.2. Caractéristiques générales	501
23.3. Constitution	501
23.4. Force électromotrice.....	503
23.4.1. Capacité	504
23.4.2. Puissance	505
23.5. Cyclabilité	506
23.5.1. Les piles à combustible (0,6 à 0,8 V par élément)	507
23.5.2. Systèmes rédox.....	508
23.6. Conclusion.....	509
24 - LES PILES À COMBUSTIBLE	511
<i>Thierry ALLEAU</i>	
24.1. Un peu d'histoire... ..	511
24.2. Le principe de fonctionnement.....	512
24.3. De la cellule au module.....	514
24.4. Les différents types de piles à combustible	514
24.5. L'état d'avancement des filières de piles à combustible.....	516
24.6. Le problème du combustible.....	520
24.7. Les grands domaines d'applications de la pile à combustible	521
24.7.1. Le portable	521
24.7.2. Le transport	522
24.7.3. Le stationnaire	525
24.8. La production collective et industrielle.....	526
24.9. La production individuelle.....	527
Références	528
25 - LE VECTEUR D'ÉNERGIE « HYDROGÈNE »	529
<i>Thierry ALLEAU & Michel ROSTAING</i>	
25.1. Environnement et ressources énergétiques : deux préoccupations majeures.....	529
25.2. Quelles sont les perspectives de consommations vers 2050 ?.....	530
25.3. Quels vecteurs d'énergie dans l'avenir ?.....	531
25.4. L'hydrogène	532
25.4.1. Le marché actuel et les perspectives de production de l'hydrogène	533
25.4.2. Quelles perspectives pour le coût de l'hydrogène ?.....	534
25.4.3. Quels sont les freins actuels au développement, en France, de l'hydrogène ?	535
25.4.4. Quelles sources d'énergie pour la production d'hydrogène ?	536

25.4.5. Quelles solutions pour le transport de l'hydrogène ?	540
25.4.6. Quelles solutions pour le stockage ?	540
25.4.7. Quelle solution pour la distribution de l'hydrogène ?	542
25.4.8. Quelles solutions pour la conversion de l'hydrogène ?	542
25.4.9. Quels domaines d'applications pour l'hydrogène ?	543
25.4.10. Quels risques avec l'hydrogène ?	544
25.4.11. Quelle transition vers l'économie de l'hydrogène ?	545
25.4.12. Quels sont les acteurs de l'hydrogène ?	546
25.5. Conclusions.....	547
Bibliographie.....	548

SEPTIÈME PARTIE - L'ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE

26 - L'ÉCONOMIE DE L'ÉNERGIE	551
<i>Denis BABUSIAUX</i>	
26.1. La demande.....	551
26.2. L'offre et ses déterminants	553
26.2.1. L'estimation des réserves de pétrole	553
26.2.2. Localisation des réserves et production	554
26.2.3. L'offre de produits raffinés	555
26.2.4. L'offre d'électricité	555
26.3. Les marchés (régionaux) des énergies de réseaux	556
26.3.1. Le gaz naturel aux Etats-Unis.....	557
26.3.2. L'électricité aux Etats-Unis	557
26.3.3. L'électricité en Europe	557
26.3.4. Le gaz naturel en Europe	558
26.4. Les marchés internationaux	558
26.5. Energie et environnement.....	560
26.6. Stratégie des entreprises.....	561
Bibliographie.....	562
27 - LES PRIX ET LES COÛTS DES SOURCES D'ÉNERGIE.....	563
<i>Jean-Marie MARTIN-AMOUROUX</i>	
27.1. Introduction.....	563
27.2. D'indispensables définitions	564
27.2.1. Les prix.....	564
27.2.2. Les coûts	565
27.2.3. Relations entre coûts et prix	567
27.3. Les coûts de production des sources fossiles	569
27.3.1. Pétrole.....	570
27.3.2. Gaz naturel.....	572
27.3.3. Charbon minéral	573
27.4. Les coûts de production des carburants	575

<i>27.5. Les coûts de production de l'électricité.....</i>	<i>576</i>
27.5.1. Les coûts des grandes filières thermiques	576
27.5.2. Les coûts des autres filières	578
<i>27.6. Introduction des externalités et essai de comparaison.....</i>	<i>579</i>
<i>27.7. Conclusion.....</i>	<i>581</i>
<i>Références</i>	<i>582</i>
28 - LES COÛTS EXTERNES DE L'ÉLECTRICITÉ.....	583
<i>Ari RABL & Joseph SPADARO</i>	
<i>28.1. Introduction.....</i>	<i>584</i>
<i>28.2. Méthodologie.....</i>	<i>585</i>
28.2.1. Dispersion atmosphérique	586
28.2.2. Les impacts sur la santé	586
28.2.3. L'évaluation monétaire	589
<i>28.3. Les coûts par kilogramme de polluant.....</i>	<i>590</i>
<i>28.4. Les coûts des dommages par kilowattheure</i>	<i>593</i>
28.4.1. Les centrales à combustibles fossiles.....	593
28.4.2. Les centrales nucléaires.....	594
28.4.3. Les énergies renouvelables	596
<i>28.5. Autres considérations</i>	<i>598</i>
28.5.1. Comparaisons des risques de mortalité	598
28.5.2. Les problèmes du nucléaire	600
<i>28.6. Conclusion.....</i>	<i>602</i>
<i>Bibliographie.....</i>	<i>603</i>
CONCLUSION.....	607