

# Table des matières

<b>Préface</b> .....	V
<b>1 Introduction</b> .....	1
1.1 De Prométhée à «l'Homme énergivore» moderne.....	3
1.1.1 L'énergie dans la mythologie et la littérature.....	3
1.1.2 L'énergie dans l'histoire humaine.....	6
1.2 Energie et développement durable.....	14
1.2.1 Les grands enjeux .....	14
1.2.2 L'évolution des ressources et des systèmes d'offre .....	18
1.2.3 Des scénarios prospectifs contrastés .....	20
1.2.4 Un secteur en profonde mutation .....	21
1.2.5 Quelle stratégie pour quel futur ? .....	23
1.3 Objectif et structure des chapitres du présent ouvrage .....	24
1.4 Références bibliographiques.....	26
<b>2 Bases physiques et thermodynamiques</b> .....	27
2.1 Notion d'énergie .....	29
2.2 Forces .....	29
2.2.1 Forces et lois de Newton .....	29
2.2.2 Limites de la mécanique newtonienne .....	31
2.2.3 Forces élémentaires et champs de forces.....	32
2.3 Energie – entropie – exerergie.....	33
2.3.1 Définition formelle de l'énergie .....	33
2.3.2 Energie sensible et énergie potentielle .....	33
2.3.3 Chaleur et température .....	34
2.3.4 Autres formes d'énergie .....	38
2.3.5 Equivalences énergétiques.....	43
2.3.6 Conservation de l'énergie: premier principe de la thermodynamique.....	43
2.3.7 Entropie: deuxième principe de la thermodynamique .....	48
2.3.8 Analyse exergetique .....	54
2.3.9 Terminologie énergétique.....	56
2.4 Systèmes d'unités et échelle d'énergie.....	59
2.4.1 Systèmes d'unités .....	59
2.4.2 Echelle d'énergies associées à différents phénomènes physiques .....	61
2.5 Annexes .....	62
2.5.1 Théorie de la relativité restreinte (bref rappel).....	62
2.5.2 Systèmes d'unités .....	62
2.5.3 Principales constantes physiques.....	69
2.6 Références bibliographiques.....	70
<b>3. Socio-économie de l'énergie</b> .....	71
3.1 Energie et développement humain.....	73
3.2 Besoins fondamentaux en énergie .....	74
3.2.1 Besoins en énergie de l'être humain.....	74

3.2.2	Besoins en énergie de collectivités humaines .....	77
3.3	Besoins en énergie des différentes sociétés .....	78
3.3.1	Energie et société .....	78
3.3.2	Principaux déterminants du développement énergétique.....	80
3.4	Evolution de la consommation d'énergie.....	82
3.4.1	Les grandes étapes de l'ère préindustrielle .....	82
3.4.2	L'ère industrielle .....	84
3.5	Situation actuelle .....	86
3.5.1	Consommation d'énergie à l'échelle mondiale.....	86
3.5.2	Situation du secteur de l'électricité.....	89
3.5.3	Bilans énergétiques de différentes collectivités .....	93
3.5.4	Relation entre consommation d'énergie et niveau de vie .....	107
3.5.5	Bilan rétrospectif de la consommation mondiale d'énergie finale pour la période 1970-2000 .....	119
3.6	Les perspectives pour le XXI <sup>e</sup> siècle .....	122
3.6.1	Les grands enjeux et les défis à relever.....	123
3.6.2	Les perspectives pour 2050: Scénario tendanciel .....	124
3.6.3	Les perspectives pour 2050: Scénario normatif.....	128
3.6.4	Perspectives à très long terme .....	146
3.7	Références bibliographiques .....	147
<b>4</b>	<b>Sources d'énergie non renouvelables .....</b>	<b>149</b>
4.1	Agents, ressources et réserves énergétiques.....	151
4.2	Charbon .....	153
4.2.1	Formation .....	153
4.2.2	Caractérisation des charbons.....	155
4.2.3	Classification des charbons .....	157
4.2.4	Utilisation du charbon .....	161
4.2.5	Réserves et ressources.....	163
4.2.6	Prospection.....	164
4.2.7	Extraction .....	164
4.2.8	Traitement et transport du charbon .....	167
4.3	Pétrole .....	170
4.3.1	Formation .....	170
4.3.2	Caractéristiques .....	170
4.3.3	Utilisation du pétrole.....	172
4.3.4	Réserves et ressources.....	175
4.3.5	Exploration, extraction, exploitation.....	178
4.3.6	Raffinage.....	186
4.3.7	Transport et stockage .....	188
4.3.8	Prix du pétrole.....	191
4.4	Gaz naturel .....	194
4.4.1	Formation .....	194
4.4.2	Caractéristiques du gaz naturel .....	197
4.4.3	Utilisation du gaz naturel .....	200
4.4.4	Réserves et ressources.....	201
4.4.5	Prospection, extraction, exploitation.....	203

4.4.6	Transport et stockage.....	204
4.4.7	Prix du gaz naturel.....	214
4.5	Energie et combustibles nucléaires.....	218
4.5.1	L'uranium et le thorium dans la nature.....	218
4.5.2	Utilisation de l'énergie nucléaire.....	219
4.5.3	Réserves et ressources.....	233
4.5.4	Cycle du combustible.....	237
4.6	Annexes.....	255
4.6.1	Propriétés physiques des gaz (rappels).....	255
4.6.2	La compression du gaz naturel.....	261
4.6.3	Utilisation du combustible nucléaire dans les centrales à eau ordinaire (PWR).....	263
4.7	Bibliographie.....	264
<b>5</b>	<b>Sources d'énergie renouvelables.....</b>	<b>265</b>
5.1	Caractéristiques générales des énergies renouvelables.....	265
5.2	Energie hydraulique.....	270
5.2.1	Origine.....	270
5.2.2	Caractéristiques.....	271
5.2.3	Potentiel.....	271
5.2.4	Utilisation.....	274
5.3	Energie solaire.....	277
5.3.1	Origine.....	277
5.3.2	Caractéristiques.....	278
5.3.3	Potentiel.....	287
5.3.4	Utilisation.....	293
5.4	Energie éolienne.....	296
5.4.1	Origine.....	296
5.4.2	Caractéristiques.....	299
5.4.3	Potentiel.....	312
5.4.4	Utilisation.....	324
5.5	Energie de la biomasse.....	331
5.5.1	Origine.....	331
5.5.2	Caractéristiques.....	331
5.5.3	Principaux produits de la photosynthèse.....	339
5.5.4	Transformation de la biomasse à des fins énergétiques.....	340
5.5.5	Modes d'utilisation des biocarburants.....	355
5.5.6	Potentiel.....	356
5.5.7	Utilisation.....	358
5.6	Energie géothermique.....	362
5.6.1	Origine.....	362
5.6.2	Caractéristiques.....	365
5.6.3	Potentiel.....	368
5.6.4	Utilisation.....	369
5.7	Energie des mers et océans.....	374
5.7.1	Origine.....	374
5.7.2	Caractéristiques.....	377
5.7.3	Potentiel.....	383
5.7.4	Utilisation.....	386

5.8	Annexes.....	390
5.8.1	Les cycles de réactions thermonucléaires dans le Soleil.....	390
5.8.2	Rayonnement solaire: données géométriques.....	391
5.8.3	Interaction du rayonnement solaire avec l'atmosphère et ses constituants.....	394
5.8.4	Stabilité et instabilité de l'atmosphère (D'après: [5.25].).....	396
5.9	Références bibliographiques .....	398
<b>6</b>	<b>Centrales thermiques .....</b>	<b>401</b>
6.1	La production d'électricité .....	403
6.1.1	Contexte général.....	403
6.1.2	Systèmes de production d'électricité envisageables jusqu'à l'horizon 2030.....	405
6.2	Centrales thermiques (classiques) .....	407
6.2.1	Généralités sur les centrales.....	407
6.2.2	Principes de base du fonctionnement des centrales thermiques: cycles thermodynamiques .....	410
6.2.3	Centrales à vapeur: disposition et principaux composants .....	442
6.2.4	Centrales à turbine à gaz: disposition et principaux composants .....	459
6.2.5	Centrales à cycles combinés: disposition et modes opératoires .....	466
6.2.6	Comparaison des installations à vapeur, à gaz et diesel.....	469
6.2.7	Bref historique du développement des machines thermiques .....	470
6.3	Centrales nucléaires.....	473
6.3.1	Centrales nucléaires et centrales thermiques classiques .....	473
6.3.2	Structure d'un réacteur nucléaire .....	475
6.3.3	Calcul du cœur d'un réacteur .....	486
6.3.4	Principales filières de réacteurs nucléaires .....	486
6.3.5	Conduite d'une centrale nucléaire.....	539
6.4	Annexes.....	543
6.4.1	Pouvoirs énergétiques des énergies primaires (d'après [6.35]) .....	543
6.4.2	Symboles et conventions de dessin utilisés dans la représentation des schémas de centrales thermiques.....	545
6.4.3	Propriétés thermodynamiques de l'eau .....	546
6.5	Références bibliographiques .....	548
<b>7</b>	<b>Autres installations de production d'électricité.....</b>	<b>551</b>
7.1	Piles à combustibles .....	553
7.1.1	Principe de la pile à combustible .....	553
7.1.2	Types de piles à combustible .....	555
7.1.3	Thermodynamique des piles à combustible .....	559
7.1.4	Performances des piles à combustible.....	563
7.1.5	Aspects systèmes.....	566
7.1.6	Les piles à combustible hier et aujourd'hui .....	573
7.2	Installations utilisant des biocombustibles.....	576
7.2.1	Utilisation de biomasse pour la production d'électricité.....	576
7.2.2	Installations industrielles brûlant du biogaz d'origine agro-forestière .....	577
7.2.3	Installations décentralisées brûlant du biogaz agricole.....	581
7.2.4	Installations brûlant des déchets urbains ou du gaz de décharge.....	582

7.3	Installations utilisant l'énergie hydraulique.....	585
7.3.1	Principe de l'utilisation de l'énergie hydraulique pour la production d'énergie mécanique.....	585
7.3.2	Généralités sur les aménagements hydro-électriques.....	587
7.3.3	Barrages, ouvrages d'adduction et centrales.....	589
7.3.4	Turbines hydrauliques.....	596
7.3.5	Bref historique du développement des aménagements hydrauliques.....	606
7.3.6	Utilisation de l'énergie des marées et des vagues.....	608
7.4	Installations solaires.....	610
7.4.1	Utilisation directe de l'énergie solaire pour la production d'énergie thermique ou électrique.....	610
7.4.2	Centrales héliothermiques.....	611
7.4.3	Cellules photovoltaïques.....	617
7.4.4	Bref historique de l'évolution des technologies solaires.....	632
7.5	Aérogénérateurs.....	634
7.5.1	Utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'énergie mécanique et électrique.....	634
7.5.2	Types d'éoliennes.....	642
7.5.3	Performances des éoliennes.....	652
7.5.4	Réalisations.....	655
7.5.5	Bref historique des systèmes éoliens.....	656
7.6	Références bibliographiques.....	659
<b>8</b>	<b>Bases et critères d'évaluation des systèmes énergétiques.....</b>	<b>661</b>
8.1	Introduction.....	663
8.1.1	Perspective historique.....	663
8.1.2	Conditions générales.....	663
8.1.3	Problèmes et limites.....	665
8.2	Critères techniques.....	665
8.2.1	Efficacité énergétique.....	665
8.2.2	Souplesse de production.....	669
8.2.3	Coefficient de retour énergétique.....	671
8.2.4	Capacité de stockage (en Suisse).....	672
8.3	Critères économiques.....	674
8.3.1	Coût de production de l'électricité.....	674
8.3.2	Coûts externes.....	682
8.4	Critères d'impacts sur l'environnement.....	688
8.4.1	Caractérisation de l'environnement naturel.....	709
8.4.2	Perturbations anthropogènes de l'environnement liées au secteur énergétique.....	724
8.4.3	Comparaison des impacts environnementaux des différentes filières de production d'électricité.....	724
8.5	Critères de risques sanitaires.....	733
8.5.1	Notion et catégories de risques.....	733
8.5.2	Nature et importance des risques courants.....	735
8.5.3	Perception et acceptation du risque.....	739
8.5.4	Comparaison des risques sanitaires liés au fonctionnement normal des différentes filières de production d'électricité.....	741
8.5.5	Les risques d'accidents graves.....	746

8.6	Annexes.....	753
8.6.1	Impacts des rejets de gaz carbonique et autres gaz à effet de serre .....	753
8.6.2	Méthodologie de l'analyse probabiliste de sécurité.....	784
8.7	Références bibliographiques .....	792
<b>9</b>	<b>Processus d'aide à la décision.....</b>	<b>795</b>
9.1	Contexte général du processus de décision dans le secteur énergétique.....	797
9.2	Préalable au processus de décision: l'analyse de l'offre et de la demande.....	799
9.2.1	Evolution de la demande.....	799
9.2.2	Systèmes d'offre globale d'énergie.....	810
9.3	Planification intégrée de la production d'électricité sur la base du moindre coût .....	820
9.3.1	Méthodologie générale et données de base.....	821
9.3.2	Génération de plans d'expansion .....	821
9.3.3	Prise en compte de la disponibilité aléatoire des unités.....	823
9.3.4	Plan d'expansion optimal (programmation dynamique).....	827
9.4	Méthodes multicritères d'aide à la décision.....	833
9.4.1	Considérations générales.....	833
9.4.2	Fondements de la méthodologie multicritère.....	834
9.4.3	ELECTRE I.....	836
9.4.4	ELECTRE III et PROMÉTHÉE .....	840
9.4.5	Négociation .....	844
9.4.6	Exemple d'application de l'approche multicritère à l'évaluation de scénarios énergétiques: le projet EVALSCEN.....	856
9.4.7	Conclusions .....	859
9.5	Références bibliographiques .....	859
	<b>Index .....</b>	<b>861</b>
	<b>Biographie des auteurs.....</b>	<b>875</b>