

Table des matières

Avant-propos.	17
Jean-Claude SABONNADIÈRE	
1.1. L'énergie électrique.	17
1.2. Le nouveau paradigme	19
1.2.1. Fonctionnement de la filière énergétique dans le contexte libéralisé.	19
1.3. La production décentralisée	21
1.4. Les moyens de conversion de l'énergie	22
 PREMIÈRE PARTIE. Solaire	 25
 Chapitre 1. Production photovoltaïque d'électricité.	 27
Jean-Claude MULLER	
1.1. Présentation.	28
1.2. Conversion photovoltaïque.	29
1.2.1. Caractéristiques I-V d'une cellule et rendement de conversion	30
1.3. Cellules à base de silicium cristallin	31
1.3.1. Matière première de silicium	31
1.3.2. Silicium monocristallin	31
1.3.2.1. Techniques de croissance de monocristaux	31
1.3.2.2. Cellules record sur monocristaux	31
1.3.3. Silicium multicristallin.	32
1.3.3.1. Techniques de croissance de multicristaux.	32
1.3.3.2. Amélioration des performances des cellules réalisées sur des multicristaux.	33
1.3.4. Silicium en ruban autosupporté.	35

1.3.4.1. Techniques de croissance	35
1.3.4.2. Perspectives	35
1.4. Cellules en couches minces	36
1.4.1. Silicium polycristallin	36
1.4.2. Silicium nanocristallin & amorphe.	38
1.4.2.1. Etat de l'art et nouvelles perspectives.	38
1.4.2.2. Applications industrielles	40
1.4.3. Mariage des technologies cristallines et amorphes	40
1.4.4. Autres matériaux en couches minces émergents	41
1.4.4.1. Matériaux à base de tellure de cadmium.	41
1.4.4.2. Matériaux à base de séléniure de cuivre indium (CIS).	41
1.4.5. Perspectives des films minces.	43
1.5. Marché du photovoltaïque	44
1.5.1. Stimulation de la production par une intervention politique	44
1.5.2. Premiers effets bénéfiques sur la production et la puissance des installations.	46
1.5.3. Adaptation du produit au marché : coût du watt et du kilowatt heure PV	48
1.6. Perspectives d'évolution de l'électricité photovoltaïque	49
1.7. Références bibliographiques.	50

Chapitre 2. Systèmes photovoltaïques couplés au réseau 51
 Seddik BACHA et Daniel CHATROUX

2.1. Problématique de la génération photovoltaïque couplée au réseau	51
2.2. Généralités sur le raccordement.	54
2.2.1. L'interfaçage avec le réseau.	54
2.2.2. Généralités sur le contrôle/commande.	56
2.3. Les architectures physiques	57
2.3.1. Onduleur central.	59
2.3.2. Onduleur individuel	59
2.3.3. Onduleur de rangée.	59
2.3.4. Onduleur multi-rangées	59
2.3.5. Conclusion	59
2.4. Contraintes relatives à la fourniture d'énergie au réseau public	61
2.4.1. Qualité de l'énergie fournie	61
2.4.2. Sécurité	62
2.4.2.1. Sécurité vis-à-vis du réseau.	62
2.4.2.2. Sécurité vis-à-vis de l'installation	63
2.5. Les architectures algorithmiques	65
2.5.1. La recherche du MPPT.	65
2.5.2. Le contrôle de l'onduleur réseau et de la chaîne globale	68
2.6. Conclusion	69
2.7. Références bibliographiques.	70

Chapitre 3. Chauffage solaire	71
Christophe MARVILLET	
3.1. Introduction.	71
3.1.1. Quelques éléments d'histoire	71
3.1.2. Quelques éléments chiffrés	73
3.1.3. Performance des dispositifs de chauffage solaire	75
3.2. La ressource énergétique solaire	76
3.2.1. Le mouvement apparent du soleil	76
3.2.2. Evaluation du flux solaire reçue par un capteur	79
3.3. Les capteurs solaires plans	80
3.3.1. Les différentes technologies de capteurs solaires thermiques	80
3.3.2. Evaluation des performances thermiques des capteurs solaires	83
3.3.3. Sélectivité des revêtements de l'absorbeur et des vitrages	85
3.4. Les systèmes de chauffage solaires.	87
3.4.1. Les chauffe-eau solaires individuels et collectifs	87
3.4.2. Les systèmes solaires combinés pour le chauffage des bâtiments.	88
3.5. Références bibliographiques.	89
Chapitre 4. Les centrales solaires thermodynamiques.	91
Alain FERRIÈRE	
Introduction	91
4.1. Les technologies solaires à concentration	93
4.1.1. Pourquoi concentrer le rayonnement solaire	93
4.1.2. Les systèmes concentrateurs	95
4.1.2.1. Le concentrateur parabolique.	97
4.1.2.2. Le concentrateur à tour	100
4.1.2.3. Le concentrateur cylindro-parabolique	101
4.1.3. Les composants pour la production de chaleur et la conversion en électricité.	105
4.1.3.1. Le récepteur solaire	105
4.1.3.2. Le fluide de transfert.	107
4.1.4. Le stockage et l'hybridation.	112
4.2. L'état de l'art.	114
4.2.1. Les centrales solaires de première génération et les travaux exploratoires	114
4.2.2. Les centrales solaires de deuxième génération : des prototypes précommerciaux	120
4.3. Les perspectives	124
4.3.1. Stratégie de pénétration du marché.	124
4.3.1.1. Les centrales du futur et les efforts de recherche	129
4.3.1.2. Conclusions	132
4.4. Références bibliographiques.	133

DEUXIÈME PARTIE. Eolien	135
Chapitre 5. Technologie des systèmes éoliens	137
Régine BELHOMME, Daniel ROYE, Nicolas LAVERDURE	
5.1. Introduction : l'énergie éolienne d'aujourd'hui.	137
5.2. Constitution d'une éolienne	139
5.2.1. Principe.	139
5.2.2. Constitution	140
5.3. Fonctionnement d'une éolienne	141
5.3.1. Contrôles de la conversion d'énergie	141
5.3.2. Contrôle au niveau de la turbine	142
5.3.2.1. Action du vent sur les pales de la turbine.	142
5.3.2.2. Méthodes de contrôle au niveau de la turbine	146
5.3.3. Système mécanique – Transmission de la puissance	152
5.3.4. Contrôles au niveau du système générateur et transmission au réseau	
Types différents de systèmes générateurs éoliens	155
5.3.4.1. Système à vitesse fixe	
Machine asynchrone à cage : structure MAS	155
5.3.4.2. Systèmes à vitesse variable	158
5.4. Références bibliographiques.	173
5.4.1. Bibliographie	173
5.4.2. Sites constructeurs et documentation	178
5.4.3. Sites des opérateurs de réseaux français.	178
Chapitre 6. Intégration des générateurs éoliens au réseau	179
Régine BELHOMME, Daniel ROYE, Nicolas LAVERDURE	
6.1. Le raccordement au réseau	179
6.1.1. Tension au point de raccordement	180
6.1.2. Courants en régime permanent	181
6.1.3. Courants de court-circuit.	181
6.1.4. Profil de tension.	183
6.1.5. Qualité de tension.	184
6.1.5.1. Variations lentes de tension.	184
6.1.5.2. A-coups de tension.	184
6.1.5.3. Flicker	185
6.1.5.4. Harmoniques	186
6.1.5.5. Perturbations des signaux transmis sur le réseau	187
6.1.6. Stabilité et plan de protection	188
6.1.6.1. Tenue en régimes normal et exceptionnel	188
6.1.6.2. Tenue aux creux de tension (FRT « <i>Fault-Ride-Through</i> » ou LVRT « <i>Low-Voltage-Ride Through</i> »).	189

6.1.6.3. Interaction avec le plan de protection	192
6.1.7. Services système	193
6.1.7.1. Réglage de tension et compensation réactive	194
6.1.7.2. Réglage de fréquence	196
6.1.7.3. Fonctionnement en réseau séparé et reconstitution de réseaux	198
6.1.8. Variabilité et imprévisibilité de la production	199
6.1.9. Autres solutions pour les problèmes de raccordement	199
6.1.9.1. Renforcement de réseaux	199
6.1.9.2. Effacement de production.	200
6.1.9.3. Coordination avec d'autres moyens de production	200
6.1.9.4. Contrôle de charge	201
6.1.9.5. Systèmes de compensation de réactif et de contrôle de tension.	202
6.1.9.6. Systèmes de tenue aux creux de tension	204
6.1.9.7. Systèmes de stockage d'énergie	205
6.1.9.8. Limiteurs de courant de court-circuit	206
6.1.9.9. Autres équipements	206
6.2. Comparaison des technologies et conclusion	207
6.3. Références bibliographiques.	209
6.3.1. Bibliographie	209
6.3.2. Sites constructeurs et documentation	214
6.3.3. Sites des opérateurs de réseaux français.	215
6.4. Annexe : table des symboles.	215
6.4.1. Paramètres et grandeurs physiques.	215
6.4.1.1. Grandeur temporelle	215
6.4.1.2. Turbine, Pales.	215
6.4.1.3. Système mécanique	216
6.4.1.4. Machines asynchrones et synchrone	216
6.4.1.5. Bus continu	218
6.4.1.6. Onduleur connecté au réseau et MLI.	219
6.4.1.7. Réseau	219
6.4.2. Valeurs des paramètres	219
 TROISIÈME PARTIE. Energies hydraulique et marines	 221
 Chapitre 7. Systèmes de conversion des ressources énergétiques marines.	 223
Bernard MULTON, Alain CLÉMENT, Marie RUELLAN, Julien SEIGNEURBIEUX, Hamid BEN AHMED	
7.1. Introduction.	223
7.2. Productivité électrique à partir du gisement marin.	225
7.2.1. Ressources énergétiques des mers	225

7.2.1.1. Chaleur solaire	225
7.2.1.2. Energie éolienne	225
7.2.1.3. Energie houlomotrice	226
7.2.1.4. Courants de marée	226
7.2.1.5. Courants océaniques continus	227
7.2.1.6. Energie osmotique	227
7.2.1.7. Biomasse océanique	228
7.2.1.8. Bilan	228
7.2.2. Aspects technico-économiques généraux	228
7.3. Systèmes houlo-générateurs (WEC : <i>wave energy converters</i>)	230
7.3.1. Caractéristiques énergétiques de la houle	230
7.3.2. Diversité de systèmes de conversion.	234
7.3.3. Systèmes à rampe de déferlement	235
7.3.4. Systèmes à colonne d'eau oscillante (OWC oscillating water column).	237
7.3.5. Systèmes à corps mus par la houle	239
7.4. Convertisseurs de l'énergie des marées (TEC : <i>tidal energy converters</i>).	242
7.4.1. Caractéristiques des marées et autres courants marins	242
7.4.2. Systèmes de production marémoteurs à barrage	244
7.4.3. Systèmes de récupération de l'énergie des courants marins	247
7.5. Autres systèmes de conversion	254
7.5.1. Aérogénérateurs <i>Offshore</i>	254
7.5.2. Convertisseurs exploitant l'énergie thermique des mers (OTEC : <i>ocean thermal energy converter</i>)	259
7.6. Conclusion	261
7.7. Références bibliographiques	263
Chapitre 8. La petite hydroélectricité	267
Raymond CHENAL, Aline CHOULOT, Vincent DENIS, Norbert TISSOT	
8.1. Introduction.	267
8.2. Qu'est-ce que la petite hydraulique.	269
8.3. L'énergie hydraulique.	271
8.4. L'exploitation de la force hydraulique	273
8.4.1. Description d'un aménagement type.	274
8.4.2. Les différents types d'aménagement rencontrés	274
8.4.3. Les différents types de turbine	276
8.4.3.1. La turbine Pelton	276
8.4.3.2. La turbine Francis	277
8.4.3.3. La turbine diagonale	278
8.4.3.4. La turbine Kaplan	278
8.4.3.5. La roue à eau par-dessus	279

8.4.3.6. La turbine Banki ou Crossflow	280
8.4.3.7. La vis d'Archimède inversée	280
8.4.4. Applications particulières de la petite hydraulique	280
8.4.4.1. Turbinage sur les réseaux d'eau potable	280
8.4.4.2. Turbinage sur les réseaux d'assainissement	283
8.4.4.3. Récupération d'énergie dans les usines de dessalement	284
8.5. Potentiel	284
8.5.1. La petite hydraulique au niveau mondial	284
8.5.2. La petite hydraulique au niveau européen	284
8.5.3. Possibilités de développement de la petite hydraulique en Europe	285
8.6. Recherche et développement en petite hydraulique	285
8.6.1. Développement d'équipements adaptés à chaque site.	286
8.6.2. Développement de la vitesse variable	286
8.6.3. Développement dans les génératrices	287
8.6.4. Développement dans le contrôle commande	287
8.6.5. Les barrages gonflables	288
8.6.6. Les prises d'eau	288
8.7. Aspects environnementaux de la petite hydraulique	289
8.7.1. Etat initial du milieu	289
8.7.2. Phase d'aménagement	289
8.7.2.1. Aménagement de la petite centrale pour son intégration dans l'écosystème.	289
8.7.2.2. Flux de matériaux et d'équipement	292
8.7.3. Principaux entrants et sortants pendant la phase de fonctionnement	293
8.7.3.1. L'eau	293
8.7.3.2. Matériaux charriés par le cours d'eau	294
8.7.3.3. Bruit	294
8.7.3.4. Production d'électricité	294
8.8. Politique en faveur de la petite hydraulique.	294
8.8.1. Programme de R&D	294
8.8.2. Mesures tarifaires	295
8.9. Conclusions.	297
8.10. Références bibliographiques	298
8.10.1. Bibliographie.	298
8.10.2. Sites particuliers	299
Index	301