

# Table des matières

<b>Introduction</b> . . . . .	1
Gilles FLAMANT	
<b>Chapitre 1. Centrales solaires : état de l'art</b> . . . . .	5
Gilles FLAMANT	
1.1. Introduction. . . . .	5
1.2. Historique. . . . .	8
1.3. Les différentes configurations de centrales solaires . . . . .	11
1.4. Paradigme des centrales solaires, l' <i>optimum</i> température-facteur de concentration. . . . .	15
1.5. Les centrales cylindro-paraboliques . . . . .	18
1.6. Les centrales à concentrateurs Fresnel linéaires . . . . .	26
1.7. Les centrales à tour . . . . .	29
1.8. Les modules parabole-moteur . . . . .	35
1.9. Perspectives : déploiement, facteur de charge, coûts, impact environnemental et nouveaux concepts . . . . .	38
1.9.1. Déploiement commercial . . . . .	38
1.9.2. Facteur de charge . . . . .	40
1.9.3. Coût de l'électricité. . . . .	41
1.9.4. Impact environnemental . . . . .	44
1.9.5. Évolutions technologiques et nouvelles générations (GEN3) . . . . .	45
1.10. Conclusion . . . . .	48
1.11. Bibliographie . . . . .	48

<b>Chapitre 2. Mesure, estimation et prévision de la ressource solaire</b> . . . . .	<b>53</b>
Stéphane THIL et Stéphane GRIEU	
2.1. Introduction. . . . .	53
2.2. Mesure et estimation de la ressource solaire . . . . .	53
2.2.1. Le couple Terre/Soleil . . . . .	53
2.2.2. L'éclairement solaire extra-atmosphérique . . . . .	57
2.2.3. Interaction de l'éclairement solaire avec l'atmosphère . . . . .	60
2.2.4. Composantes de l'éclairement solaire et instruments associés . . . . .	66
2.3. Prévision de l'éclairement normal direct. . . . .	75
2.3.1. Définitions et besoins d'un opérateur de centrale CSP . . . . .	75
2.3.2. Principales techniques de prévision du DNI . . . . .	77
2.3.3. Modèles de prévision infrahoraire du DNI . . . . .	79
2.4. Conclusion . . . . .	86
2.5. Nomenclature . . . . .	87
2.6. Bibliographie. . . . .	88
<b>Chapitre 3. Systèmes optiques de concentration</b> . . . . .	<b>95</b>
François HÉNAULT, Benjamin GRANGE et Quentin FALCOZ	
3.1. Introduction. . . . .	95
3.2. Historique. . . . .	96
3.2.1. D'Archimède au XIX <sup>e</sup> siècle. . . . .	96
3.2.2. 1950-1980 : premières installations industrielles . . . . .	99
3.3. Les performances et leurs limites . . . . .	103
3.3.1. Spécification d'un concentrateur solaire . . . . .	103
3.3.2. Puissance collectée . . . . .	104
3.3.3. Trois définitions de la concentration. . . . .	105
3.3.4. Concentration maximale – Loi de Stefan . . . . .	108
3.3.5. Erreurs spécifiques des concentrateurs solaires . . . . .	111
3.3.6. Pertes en concentration et « règle d'or » de la concentration solaire. . . . .	119
3.4. Qualification optique des concentrateurs cylindro-paraboliques. . . . .	121
3.4.1. Définitions . . . . .	121
3.4.2. Méthodologie . . . . .	123
3.4.3. Exemple . . . . .	124
3.5. Les champs d'héliostats des centrales à tour . . . . .	125
3.5.1. Description. . . . .	125

3.5.2. Pertes optiques. . . . .	127
3.5.3. Simulations des champs d'héliostats. . . . .	133
3.6. Conclusion . . . . .	136
3.7 Bibliographie . . . . .	136

## **Chapitre 4. Récepteurs solaires. . . . . 139**

Benjamin GRANGE

4.1. Introduction. . . . .	139
4.2. Les tubes absorbeurs pour concentrateurs linéaires . . . . .	139
4.2.1. Description . . . . .	139
4.2.2. Pertes thermiques . . . . .	140
4.3. Les récepteurs solaires pour centrales à tour . . . . .	143
4.3.1. Description. . . . .	143
4.3.2. Récepteurs dans les centrales à tour commerciales . . . . .	144
4.3.3. Concepts émergents . . . . .	148
4.3.4. Pertes thermiques . . . . .	154
4.3.5. Modèle thermique des récepteurs solaires . . . . .	157
4.4. Conclusion . . . . .	163
4.5. Bibliographie. . . . .	163

## **Chapitre 5. Fluides caloporteurs pour centrales solaires. . . . . 167**

Gilles FLAMANT

5.1. Introduction. . . . .	167
5.2. Rappel sur la physique des transferts thermiques. . . . .	168
5.3. Les fluides, stabilité et propriétés. . . . .	170
5.3.1. Stabilité thermique des fluides caloporteurs . . . . .	170
5.3.2. Propriétés physiques des fluides caloporteurs . . . . .	172
5.4. Coefficients d'échange fluide-paroi . . . . .	175
5.4.1. Conditions d'écoulement . . . . .	175
5.4.2. Corrélations . . . . .	175
5.4.3. Coefficients d'échange. . . . .	176
5.5. Solutions en développement . . . . .	180
5.5.1. Abaissement de la température de fusion des sels . . . . .	180
5.5.2. Augmentation de la température maximale d'utilisation . . . . .	181
5.6. Conclusion . . . . .	182
5.7. Bibliographie. . . . .	182

## **Chapitre 6. Simulations numériques des écoulements et transferts thermiques des récepteurs solaires . . . . . 185**

Françoise BATAILLE, Adrien TOUTANT et Dorian DUPUY

6.1. Introduction. . . . .	185
6.2. Niveaux d’approches . . . . .	188
6.2.1. Simulation numérique directe. . . . .	189
6.2.2. Simulation thermique des grandes échelles. . . . .	190
6.2.3. RANS ( <i>Reynolds Averaged Navier Stokes equations</i> ) . . . . .	191
6.2.4. Corrélations . . . . .	192
6.3. Simulation numérique directe et simulation thermique des grandes échelles . . . . .	193
6.3.1. Géométrie . . . . .	193
6.3.2. Équations de la simulation numérique directe . . . . .	194
6.3.3. Résultats de SND . . . . .	195
6.3.4. Équations de la simulation thermique des grandes échelles . . . . .	197
6.3.5. Résultats de SGE . . . . .	199
6.4. Couplages dynamique et thermique – Approche physique . . . . .	202
6.4.1. Analyse des grandeurs intégrales. . . . .	203
6.4.2. Analyse dans le domaine spatial . . . . .	204
6.4.3. Analyse dans le domaine spectral . . . . .	211
6.5. Conclusion . . . . .	218
6.6. Bibliographie. . . . .	218

## **Chapitre 7. Matériaux pour le solaire à concentration . . . . . 221**

Audrey SOUM-GLAUDE et Antoine GROSJEAN

7.1. Introduction. . . . .	221
7.2. Propriétés optiques des matériaux . . . . .	222
7.2.1. Propriétés spectrales . . . . .	222
7.2.2. Performance solaire. . . . .	223
7.3. Composants réflecteurs : miroirs solaires . . . . .	224
7.3.1. Indicateur de performance optique : réflectance solaire . . . . .	224
7.3.2. Matériaux et structures des miroirs solaires . . . . .	225
7.3.3. Vieillessement et durabilité des miroirs solaires . . . . .	228
7.4. Composants transparents : vitres protectrices. . . . .	229
7.4.1. Indicateur de performance optique : transmittance solaire . . . . .	229
7.4.2. Matériaux et structures de vitres protectrices. . . . .	230
7.4.3. Vieillessement et durabilité des verres antireflets . . . . .	234

7.5. Composants absorbants : absorbeurs solaires . . . . .	234
7.5.1. Indicateurs de performance optique des absorbeurs solaires . . . . .	234
7.5.2. Matériaux et structures des absorbeurs solaires . . . . .	242
7.5.3. Vieillessement et durabilité des absorbeurs solaires . . . . .	246
7.6. Conclusion . . . . .	247
7.7. Bibliographie . . . . .	248

## **Chapitre 8. Stockage thermique . . . . . 253**

Aubin TOUZO, Quentin FALCOZ et Gilles FLAMANT

8.1. Introduction . . . . .	253
8.1.1. Avantages liés au stockage thermique . . . . .	253
8.1.2. Généralités sur le stockage thermique . . . . .	254
8.1.3. Intégration du stockage dans le dimensionnement de la centrale solaire . . . . .	255
8.2. Stockage à deux cuves par sels fondus . . . . .	256
8.2.1. Exemples de centrales existantes . . . . .	256
8.2.2. Principe de fonctionnement . . . . .	257
8.2.3. Matériaux utilisés . . . . .	258
8.2.4. Avantage économique . . . . .	258
8.2.5. Inconvénients liés aux systèmes de stockage par sels fondus . . . . .	259
8.3. Stockage de type thermocline . . . . .	260
8.3.1. Exemples de centrales solaires avec stockage thermocline . . . . .	260
8.3.2. Principe de fonctionnement . . . . .	262
8.3.3. Modélisation . . . . .	263
8.3.4. Problématique de l'intégration dans une centrale solaire . . . . .	264
8.3.5. Matériaux de stockage . . . . .	267
8.3.6. Analyse de cycle de vie . . . . .	269
8.3.7. Considérations économiques . . . . .	270
8.4. Procédés à accumulation de vapeur . . . . .	270
8.4.1. Centrales existantes . . . . .	270
8.4.2. Principe de fonctionnement . . . . .	272
8.4.3. Inconvénients . . . . .	273
8.5. Centrale solaire à récepteur à particules . . . . .	273
8.6. Recherche et développement des procédés à chaleur latente . . . . .	274
8.6.1. Échangeur avec MCP . . . . .	274
8.6.2. Encapsulation de MCP . . . . .	275
8.6.3. Principe . . . . .	276
8.6.4. Inconvénients des matériaux à changement de phase . . . . .	277
8.7. Stockage thermochimique . . . . .	277
8.8. Comparaison du coût de l'électricité solaire stockée . . . . .	278

8.9. Conclusion . . . . .	280
8.10. Bibliographie . . . . .	281

**Chapitre 9. Systèmes hybrides PV-CSP . . . . . 285**

Alexis VOSSIER et Joya ZEITOUNY

9.1. Introduction . . . . .	285
9.2. Stratégies hybrides . . . . .	287
9.3. Stratégies hybrides non compactes . . . . .	288
9.4. Stratégies hybrides compactes . . . . .	289
9.4.1. Approche haute température . . . . .	290
9.4.2. Division spectrale . . . . .	296
9.4.3. Performances comparées des principales stratégies hybrides . . . . .	299
9.4.4. Systèmes hybrides PV-TS . . . . .	300
9.5. Systèmes hybrides innovants . . . . .	302
9.5.1. Systèmes hybrides mixtes . . . . .	302
9.5.2. Convertisseurs solaires luminescents . . . . .	304
9.5.3. Stockage d'énergie thermique très haute température couplée à la conversion photovoltaïque . . . . .	305
9.6. Conclusion . . . . .	307
9.7. Bibliographie . . . . .	308

**Chapitre 10. Combustibles de synthèse à partir  
de ressources hydrocarbonées . . . . . 311**

Sylvain RODAT et Stéphane ABANADES

10.1. Introduction . . . . .	311
10.2. Conversion des matières carbonées par énergie solaire . . . . .	313
10.2.1. Craquage et reformage solaires d'hydrocarbures . . . . .	313
10.2.2. Pyrolyse et gazéification solaires de matériaux carbonés solides . . . . .	322
10.3. Conclusion . . . . .	327
10.4. Bibliographie . . . . .	328

**Chapitre 11. Production de carburants solaires par dissociation  
thermochimique de l'eau et du CO<sub>2</sub> . . . . . 331**

Stéphane ABANADES et Sylvain RODAT

11.1. Introduction . . . . .	331
11.2. Thermolyse directe de H <sub>2</sub> O et CO <sub>2</sub> . . . . .	332

---

11.3. Cycles thermochimiques . . . . .	334
11.3.1. Principe . . . . .	334
11.3.2. Cycles à oxydes volatils . . . . .	338
11.3.3. Cycles à oxydes non volatils. . . . .	341
11.3.4. Cycles à oxydes non stœchiométriques . . . . .	342
11.3.5. Concepts de réacteurs solaires pour la mise en œuvre des cycles . . . . .	345
11.4. Conclusion . . . . .	352
11.5. Bibliographie . . . . .	353
<b>Liste des auteurs.</b> . . . . .	<b>359</b>
<b>Index.</b> . . . . .	<b>361</b>