

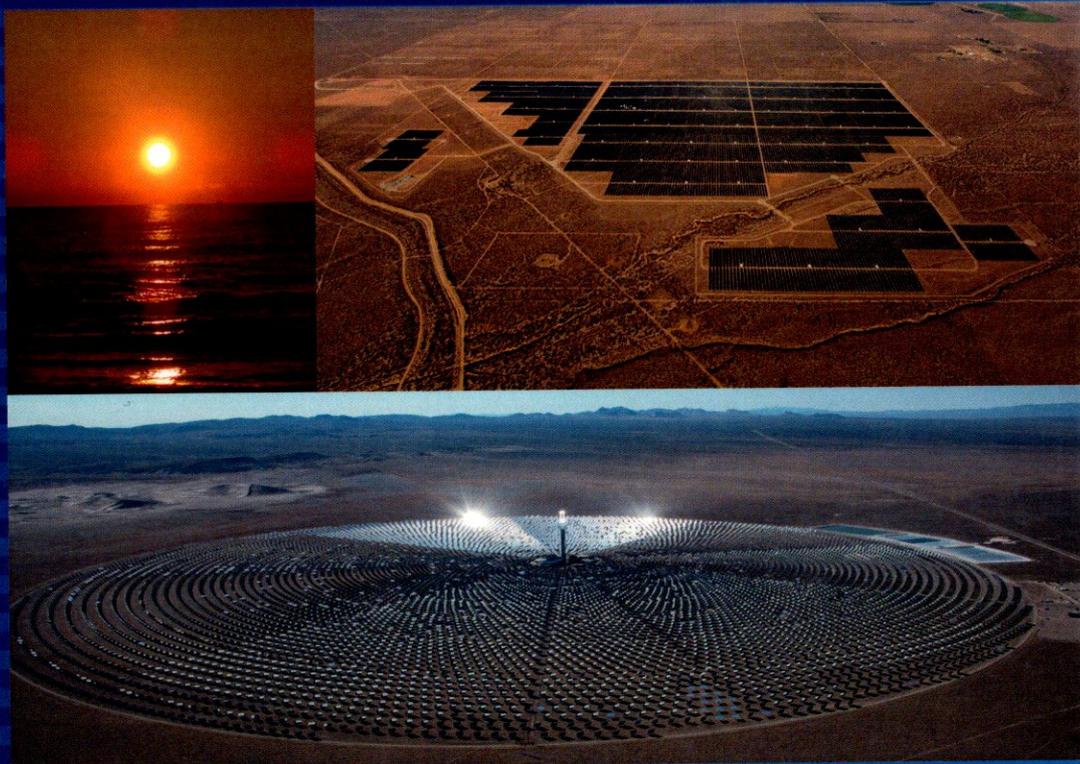
 **edf** COLLECTION EDF R&D

4A

L'énergie solaire

Des fondamentaux aux technologies d'aujourd'hui et de demain

Robert Soler



Lavoisier
TEC & DOC

Sommaire

| | |
|--------------------|------|
| PRÉFACE | XVII |
| AVANT-PROPOS | XXI |

PARTIE 1 LA RESSOURCE SOLAIRE

| | |
|---|-----------|
| CHAPITRE 1 Grandeurs radiométriques | 3 |
| 1. Grandeurs géométriques : rappel sur l'angle solide | 3 |
| 1.1. Définition | 3 |
| 1.2. Angle solide élémentaire | 4 |
| 1.3. Forme intégrale de l'angle solide | 5 |
| 1.4. Cas particuliers | 5 |
| 2. Grandeurs radiométriques | 6 |
| 2.1. Énergie radiative (ou énergie rayonnante), Q [J] | 6 |
| 2.2. Flux énergétique (ou flux radiatif), Φ [W] | 6 |
| 2.3. Intensité énergétique, I [$W \cdot sr^{-1}$] | 6 |
| 2.4. Luminance énergétique, L [$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$] | 7 |
| 2.5. Densité de flux énergétique $d\Phi/dS$ [$W \cdot m^{-2}$] : exitance et éclairement | 8 |
| 2.6. Ensoleillement (ou insolation), H [$J \cdot m^{-2}$] ou [$kWh \cdot m^{-2}$] | 9 |
| 3. Grandeurs spectro-radiométriques | 10 |
| 3.1. Les grandeurs spectrales | 10 |
| 3.2. Le cas du corps noir | 11 |
| 4. Grandeurs photoniques | 13 |
| CHAPITRE 2 Le soleil, source d'énergie | 15 |
| 1. Le soleil, source d'énergie | 15 |
| 2. La nature spectrale du rayonnement solaire | 18 |
| 3. Flux solaire moyen intercepté par la terre | 19 |
| 3.1. Flux rayonné par le soleil | 19 |
| 3.2. Flux solaire intercepté par la terre | 20 |
| 4. L'éclairement solaire au sommet de l'atmosphère terrestre | 21 |
| 4.1. L'éclairement solaire total (TSI) | 21 |
| 4.2. Un exemple de formule approchée de l'éclairement extraterrestre sous incidence normale (ETNI) | 23 |
| CHAPITRE 3 L'atténuation atmosphérique | 25 |
| 1. Les processus d'atténuation du rayonnement dans l'atmosphère | 25 |
| 1.1. Les différents processus | 26 |

| | |
|---|----|
| 1.2. Le spectre du rayonnement au sol | 28 |
| 2. Les composants du rayonnement solaire reçu par une surface au sol | 29 |
| 2.1. Le rayonnement direct | 30 |
| 2.2. Le rayonnement diffus | 31 |
| 2.3. Le rayonnement réfléchi | 31 |
| 2.4. Exemple de tracé des composants du rayonnement solaire | 31 |
| 3. La masse d'air et les spectres de référence | 33 |
| 3.1. La masse d'air | 33 |
| 3.2. Les spectres de référence | 33 |
| 4. La modélisation des conditions de ciel clair | 35 |
| 4.1. Le processus d'extinction du rayonnement extraterrestre par ciel clair | 37 |
| 4.2. Le modèle de ciel clair de l'Atlas solaire européen | 37 |

CHAPITRE 4 La mesure du rayonnement au sol

| | |
|--|----|
| 1. La sélection d'un site d'implantation d'un projet solaire | 43 |
| 2. La mesure radiométrique sur site | 44 |
| 2.1. Les radiomètres à thermopile | 45 |
| 2.2. Les stations de mesures radiométriques à trois composants | 46 |
| 2.3. Quelques alternatives aux stations de mesure à trois composants | 50 |
| 2.4. Mesure de l'éclairement en fonction de la longueur d'onde avec un spectroradiomètre | 51 |
| 3. Les réseaux de stations de mesure au sol | 54 |
| 4. Le traitement d'images satellitaires | 54 |
| 4.1. Le système d'observation de l'atmosphère terrestre | 56 |
| 4.2. Bases de données issues du traitement d'images satellitaires | 57 |
| 5. L'année météorologique typique (TMY, typical meteorological year) | 60 |
| 6. Caractérisation de la variabilité de la ressource solaire | 61 |
| 6.1. Variabilité de court terme | 63 |
| 6.2. Variabilité interannuelle | 63 |
| 6.3. Variabilité de long terme | 64 |
| 6.4. Variabilité spatiale | 64 |
| 7. Prévoir le rayonnement solaire | 65 |

CHAPITRE 5 Le mouvement apparent du soleil

| | |
|--|----|
| 1. Le globe terrestre et les coordonnées géographiques : latitude et longitude | 71 |
| 2. La relation terre-soleil | 72 |
| 2.1. L'orbite terrestre | 72 |
| 2.2. Les perturbations de l'orbite terrestre | 72 |
| 2.3. La sphère céleste et le mouvement apparent du soleil | 74 |
| 3. La mesure du temps | 76 |
| 3.1. La mesure des années et des jours | 77 |
| 3.2. Le jour julien : un système de numérotation continu des jours | 77 |
| 3.3. Le jour julien : un système de numérotation continu des jours | 78 |

| | |
|---|-----|
| 3.3. Une approche simplifiée de la numérotation des jours | 79 |
| 4. Le repérage du mouvement apparent du soleil sur la sphère céleste | 81 |
| 4.1. Les coordonnées éclipptiques du soleil : latitude et longitude | 81 |
| 4.2. Les coordonnées équatoriales du soleil : déclinaison et ascension droite | 84 |
| 4.3. Les coordonnées horaires du soleil : déclinaison et angle horaire | 87 |
| 4.4. L'équation du temps | 89 |
| 4.5. Les coordonnées horizontales : angle zénithal et azimut | 92 |
| 4.6. La position du soleil | 95 |
| 4.7. Les heures de lever et de coucher du soleil | 97 |
| 4.8. La durée astronomique du jour | 99 |
| 4.9. Les hauteurs – minimale et maximale – du soleil dans l'année | 100 |
| 4.10. Les algorithmes de calcul de la position du soleil | 100 |

5. Les diagrammes solaires

| | |
|--|-----|
| 5.1. Diagrammes de trajectoire | 102 |
| 5.2. L'impact des ombres portées | 107 |
| 6. Le temps solaire | 108 |
| 6.1. Le temps solaire vrai | 108 |
| 6.2. Le temps solaire moyen | 109 |
| 6.3. Le temps civil local | 110 |
| 6.4. Le temps universel (TU) | 111 |
| 6.5. Le temps légal | 112 |
| 6.6. Expression du temps solaire vrai en fonction du temps universel coordonné | 112 |

CHAPITRE 6 La position du Soleil relativement à une surface inclinée

| | |
|---|-----|
| 1. La position du Soleil par rapport à une surface inclinée | 115 |
| 1.1. Le calcul de l'angle d'incidence | 116 |
| 1.2. Trois cas particuliers | 116 |
| 2. La poursuite du Soleil (Tracking) | 117 |
| 2.1. Cas d'une surface suivant le Soleil sur un axe | 118 |
| 2.2. Cas d'une surface suivant le Soleil sur deux axes | 123 |
| 2.3. Récapitulation des résultats | 126 |

CHAPITRE 7 L'énergie collectée par une surface au sol

| | |
|---|-----|
| 1. L'ensoleillement extraterrestre reçu sur un plan incliné | 127 |
| 1.1. Sur une surface normale à la direction du Soleil | 127 |
| 1.2. Sur une surface horizontale | 129 |
| 1.3. Sur une surface inclinée | 130 |
| 2. L'ensoleillement Global reçu sur un plan incliné | 132 |
| 2.1. L'étape de séparation | 133 |
| 2.2. L'étape de transposition | 137 |
| 2.3. L'éclairement global | 139 |

| | |
|--|-----|
| 3. L'impact de l'utilisation des systèmes de poursuite du Soleil sur le rayonnement collecté | 140 |
| 3.1. Suivi du Soleil sur deux axes | 141 |
| 3.2. Suivi du Soleil sur un axe | 141 |

| | |
|----------------------------|-----|
| BIBLIOGRAPHIE | 145 |
|----------------------------|-----|

PARTIE 2 LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE

| | |
|---|-----|
| CHAPITRE 8 Survol historique | 151 |
| 1. De la découverte de l'effet photovoltaïque (1839) à la première cellule solaire au silicium (1954) | 151 |
| 2. L'essor du photovoltaïque dans l'espace dans les années 1960 | 153 |
| 3. Le photovoltaïque redescend sur Terre à partir des années 1970 | 153 |
| 4. Le développement massif de la filière à partir des années 2000 | 156 |

CHAPITRE 9 Le diagramme de bandes des semi-conducteurs pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire

| | |
|---|-----|
| 1. Structure cristalline des semi-conducteurs usuels utilisés | 159 |
| 1.1. Réseaux cristallins | 159 |
| 1.2. Réseau réciproque | 159 |
| 1.3. Les plans réticulaires dans le réseau cristallin | 166 |
| 1.4. Les zones de Brillouin d'un réseau réciproque | 168 |
| 2. Le diagramme de bandes | 175 |
| 2.1. Qu'est-ce qu'un diagramme de bandes ? | 178 |
| 2.2. La formation des bandes d'énergie selon la méthode LCAO | 178 |
| 2.3. La formation des bandes d'énergie selon la théorie des bandes | 179 |
| 2.4. Nombre d'états électroniques dans une bande | 183 |
| 3. Pourquoi un semi-conducteur permet la conversion photovoltaïque du rayonnement solaire ? | 195 |
| 3.1. Métaux, isolants et semi-conducteurs | 196 |
| 3.2. Les types de bandes interdites des semi-conducteurs | 196 |
| 3.3. Les semi-conducteurs utilisés pour la conversion photovoltaïque | 199 |
| 4. L'approche semi-classique : notion de masse effective | 200 |
| 4.1. Masse effective des électrons | 201 |
| 4.2. Vitesse des électrons | 201 |
| 4.3. Les trous | 203 |
| 4.4. Densité d'états et masses effectives de densité d'états | 204 |
| 5. Nombre total de porteurs dans un semi-conducteur cristallin | 205 |
| 5.1. Probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie : la statistique de Fermi-Dirac | 209 |
| 5.2. Nombre total de porteurs libres dans un semi-conducteur | 209 |

CHAPITRE 10 Dopage des semi-conducteurs et transport de charges

| | |
|---|-----|
| 1. Semi-conducteur homogène à l'équilibre | 213 |
| 1.1. Semi-conducteur intrinsèque | 213 |
| 1.2. Semi-conducteur extrinsèque : dopage | 215 |
| 2. Semi-conducteur hors équilibre : phénomènes de transport | 225 |
| 2.1. Courant de dérive en présence d'un champ électrique | 225 |
| 2.2. Courant de diffusion | 229 |
| 2.3. Densité de courant totale : dérive-diffusion | 229 |
| 2.4. Coefficient de diffusion : relation d'Einstein | 229 |
| 3. Les équations fondamentales pour l'étude des semi-conducteurs | 230 |
| 3.1. Équations de continuité | 231 |
| 3.2. Équation de Poisson | 232 |
| 3.3. Résumé : les équations fondamentales | 233 |
| 4. Un exemple d'utilisation des équations fondamentales : le calcul de la longueur de diffusion | 233 |
| 4.1. Lorsque le champ électrique est nul | 234 |
| 4.2. Lorsque le champ électrique est uniforme | 236 |

CHAPITRE 11 Absorption de la lumière dans les semi-conducteurs

| | |
|---|-----|
| 1. Flux d'énergie et flux de photons | 239 |
| 2. Absorption de la lumière | 240 |
| 2.1. Coefficient d'absorption | 242 |
| 2.2. Taux de génération de paires électron-trou | 244 |
| 2.3. Régimes d'injection | 245 |
| 3. Le processus de recombinaison | 246 |
| 3.1. Taux de recombinaison R | 247 |
| 3.2. Taux net de recombinaison U | 247 |
| 3.3. Les mécanismes de Recombinaison | 248 |

CHAPITRE 12 La physique des cellules photovoltaïques

| | |
|---|-----|
| 1. Quelques définitions | 258 |
| 2. La jonction pn à l'équilibre | 258 |
| 2.1. Phénomènes transitoires lors de la formation de la jonction | 258 |
| 2.2. Modélisation du diagramme de bandes | 259 |
| 3. La jonction pn polarisée | 268 |
| 3.1. Polarisation de la jonction | 268 |
| 3.2. Modification des bandes : les quasi-niveaux de Fermi | 269 |
| 3.3. Concentration des porteurs dans le cas d'une jonction polarisée | 272 |
| 4. Détermination analytique de la caractéristique courant-tension de la cellule | 273 |
| 4.1. Paramètres géométriques utiles | 274 |

| | |
|--|-----|
| 4.2. Approche qualitative..... | 275 |
| 4.3. Hypothèses du modèle de cellule photovoltaïque et conditions aux limites..... | 276 |
| 4.4. Conditions d'éclairement..... | 277 |
| 4.5. Principe du calcul..... | 278 |
| 4.6. Diffusion des minoritaires dans l'émetteur de la cellule..... | 279 |
| 4.7. Diffusion des minoritaires dans la base de la cellule..... | 280 |
| 4.8. Contribution de la zone de charge d'espace au photocourant..... | 282 |
| 4.9. Caractéristique (V)..... | 283 |
| 4.10. Probabilité de collecte..... | 284 |
| 4.11. Rendement quantique (interne ou externe)..... | 287 |
| 4.12. Réponse spectrale..... | 290 |
| 5. La jonction pn comme générateur photovoltaïque..... | 291 |
| 5.1. Le schéma équivalent des cellules photovoltaïques..... | 291 |
| 5.2. Grandeurs caractéristiques du générateur..... | 293 |
| 5.3. Les conditions standards de test (STC conditions) des cellules photovoltaïques..... | 299 |
| 5.4. Effet des résistances parasites..... | 300 |
| 5.5. Influence de la température..... | 301 |
| 6. Les critères d'optimisation des performances des cellules solaires..... | 302 |
| 6.1. La maximisation du courant de court-circuit..... | 302 |
| 6.2. La maximisation de la tension de circuit ouvert..... | 303 |
| 6.3. La maximisation du facteur de forme..... | 303 |

CHAPITRE 13 Les procédés de fabrication des cellules et modules

| | |
|---|-----|
| 1. La filière silicium cristallin..... | 305 |
| 1.1. La métallurgie du silicium..... | 306 |
| 1.2. L'élaboration des cellules..... | 307 |
| 1.3. Les voies d'amélioration..... | 318 |
| 1.4. La mise en module..... | 332 |
| 2. La filière « couches minces » (CdTe et CIGS)..... | 340 |
| 2.1. Les chalcopyrites (CIGS)..... | 341 |
| 2.2. Les cellules en couches minces de tellure de cadmium (CdTe)..... | 341 |
| 3. Les systèmes photovoltaïques sous concentration..... | 351 |
| 3.1. Les mécanismes de pertes dans les cellules solaires..... | 355 |
| 3.2. Architecture et rendement des multi-jonctions..... | 355 |
| 3.3. L'augmentation du rendement sous concentration..... | 357 |
| 3.4. Typologie des systèmes à concentration..... | 360 |
| 4. Perspectives de ruptures technologiques à moyen et long terme..... | 362 |
| 4.1. Les architectures avancées à très haut rendement..... | 364 |
| 4.2. Les cellules organiques..... | 364 |
| 4.3. Les cellules photovoltaïques à pérovskites..... | 367 |
| | 371 |

CHAPITRE 14 Modules, générateurs et systèmes photovoltaïques

| | |
|---|-----|
| 1. Les groupements de cellules en série et en parallèle..... | 375 |
| 1.1. Association en série..... | 375 |
| 1.2. Association en parallèle..... | 376 |
| 2. Les modules photovoltaïques..... | 377 |
| 2.1. Mesure de la caractéristique I-V d'un module..... | 378 |
| 2.2. Les déséquilibres dans un module..... | 378 |
| 2.3. Exemple de spécifications techniques d'un module photovoltaïque..... | 383 |
| 3. Les générateurs photovoltaïques..... | 386 |
| 3.1. Caractéristique I-V d'un groupe photovoltaïque..... | 387 |
| 3.2. La protection des générateurs..... | 388 |
| 3.3. Les déséquilibres dans les générateurs..... | 389 |
| 4. La typologie des systèmes photovoltaïques..... | 391 |

CHAPITRE 15 Installations photovoltaïques en site isolé

| | |
|--|-----|
| 1. Systèmes au fil du Soleil : connexion directe entre le générateur et la charge..... | 393 |
| 1.1. Architecture d'un système au fil du Soleil..... | 393 |
| 1.2. Le convertisseur DC-DC..... | 395 |
| 1.3. La poursuite du point de la puissance maximum (MPPT, Maximum Power Point Tracking)..... | 400 |
| 2. Les systèmes autonomes..... | 403 |
| 2.1. Les systèmes autonomes..... | 403 |
| 2.2. La batterie..... | 404 |
| 2.3. Le régulateur..... | 413 |
| 3. Prédimensionner une installation électrique autonome en site isolé..... | 416 |
| 3.1. Analyser les besoins en électricité..... | 416 |
| 3.2. Estimer la capacité de stockage..... | 417 |
| 3.3. Estimer la puissance crête du champ photovoltaïque..... | 418 |

CHAPITRE 16 Les installations raccordées au réseau

| | |
|---|-----|
| 1. Architecture des installations raccordées au réseau..... | 422 |
| 1.1. Les systèmes photovoltaïques avec un micro-onduleur par module..... | 422 |
| 1.2. Les systèmes photovoltaïques avec un onduleur par chaîne ou par groupe photovoltaïque..... | 424 |
| 1.3. Les systèmes photovoltaïques avec onduleur central..... | 426 |
| 2. Fonctionnement et topologies de l'onduleur..... | 429 |
| 2.1. Caractéristiques propres à un onduleur pour installation photovoltaïque raccordée au réseau..... | 429 |
| 2.2. Les topologies des onduleurs photovoltaïques..... | 430 |
| 2.3. Rendement des onduleurs..... | 434 |

| | |
|---|-----|
| 3. La supervision et la maintenance des installations photovoltaïques raccordées au réseau..... | 436 |
| 3.1. Principe de la supervision..... | 436 |
| 3.2. Un exemple : le système de télésurveillance d'EDF énergies nouvelles..... | 438 |
| 4. Prédimensionner une installation raccordée au réseau..... | 440 |
| 4.1. Caractéristiques techniques en entrée de l'onduleur..... | 440 |
| 4.2. Le choix de la puissance de l'onduleur..... | 441 |
| 4.3. Configuration du champ solaire..... | 441 |

CHAPITRE 17 Intégration de la production photovoltaïque dans le système électrique..... 443

| | |
|---|-----|
| 1. Régime normal et régimes exceptionnels de tension et de fréquence..... | 444 |
| 1.1. Tension de raccordement des installations photovoltaïques..... | 444 |
| 1.2. Régime normal de tension..... | 444 |
| 1.3. Régime normal de fréquence..... | 445 |
| 1.4. Régimes exceptionnels de tension et/ou de fréquence..... | 445 |
| 1.5. Tenue des installations photovoltaïques aux creux de tension..... | 446 |
| 2. La production photovoltaïque et le réglage de la fréquence..... | 448 |
| 2.1. Pourquoi la fréquence du système électrique varie ?..... | 448 |
| 2.2. Le réglage de la fréquence..... | 449 |
| 2.3. Production photovoltaïque et réglage de fréquence..... | 456 |
| 3. La production photovoltaïque et le réglage de la tension..... | 456 |
| 3.1. Pourquoi la tension fluctue ?..... | 456 |
| 3.2. Le réglage de la tension..... | 457 |
| 3.3. Photovoltaïque et réglage de tension par gestion du réactif..... | 458 |
| 4. La protection des biens et personnes contre l'îlotage non sollicité..... | 461 |
| 4.1. Qu'est-ce qu'un îlotage ?..... | 461 |
| 4.2. Méthodes passives..... | 463 |
| 4.3. Méthodes actives..... | 464 |
| 4.4. Méthodes avec communication..... | 464 |

BIBLIOGRAPHIE..... 465

PARTIE 3 LES TECHNOLOGIES SOLAIRES THERMODYNAMIQUES À CONCENTRATION

| | |
|--|-----|
| CHAPITRE 18 Perspective historique..... | 473 |
| 1. La concentration du rayonnement solaire au fil des siècles..... | 473 |
| 2. Les machines à vapeur solaire au XIX ^e siècle..... | 474 |
| 3. Les premières applications d'envergure dans la première moitié du XX ^e siècle..... | 476 |

| | |
|---|-----|
| 4. Les crises pétrolières et les débuts de la production d'électricité thermique..... | 479 |
| 5. Un nouvel essor au XX ^e siècle..... | 480 |

CHAPITRE 19 Pourquoi concentrer le flux solaire ?..... 483

| | |
|---|-----|
| 1. Définitions..... | 483 |
| 1.1. Facteur de concentration..... | 483 |
| 1.2. Angle de réception..... | 485 |
| 2. Typologie des concentrateurs utilisés dans les centrales thermosolaires..... | 485 |
| 3. Pourquoi concentrer le rayonnement solaire ?..... | 487 |
| 3.1. Calcul du rendement d'absorption..... | 488 |
| 3.2. Le rendement du système complet..... | 490 |
| 4. La limite thermodynamique du facteur de concentration..... | 492 |
| 5. Facteur de concentration des miroirs paraboliques idéaux..... | 494 |
| 5.1. La forme parabolique..... | 495 |
| 5.2. Cas d'un récepteur sphérique (3D) ou tubulaire (2D)..... | 497 |
| 5.3. Cas d'un récepteur plan..... | 503 |
| 6. Les concentrateurs réels et leurs limitations..... | 505 |
| 6.1. La luminance du Soleil n'est pas uniforme..... | 505 |
| 6.2. L'erreur optique due aux imperfections des surfaces de collecte..... | 507 |
| 6.3. L'erreur de poursuite du Soleil..... | 509 |
| 6.4. La combinaison des erreurs optiques..... | 509 |
| 6.5. La détermination du facteur de concentration par les méthodes de lancer de rayons..... | 510 |
| 7. L'utilisation d'optiques secondaires..... | 510 |
| 7.1. Les optiques non imageantes : le CPC, un concentrateur idéal..... | 511 |
| 7.2. Association miroir parabolique-CPC..... | 513 |

CHAPITRE 20 Principes généraux et état de l'art..... 517

| | |
|--|-----|
| 1. Principes généraux..... | 517 |
| 1.1. Les concentrateurs..... | 517 |
| 1.2. Les fluides de transfert..... | 517 |
| 1.3. Les cycles thermodynamiques..... | 518 |
| 1.4. Le stockage thermique..... | 518 |
| 1.5. L'hybridation..... | 518 |
| 2. Principales caractéristiques des quatre technologies solaires thermodynamiques..... | 519 |
| 2.1. Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques..... | 519 |
| 2.2. Les centrales à collecteurs linéaires de Fresnel..... | 521 |
| 2.3. Les centrales à tour ou à récepteur central..... | 525 |
| 2.4. Les systèmes parabole-Stirling..... | 526 |
| 3. Les limites inhérentes à la filière solaire thermodynamique..... | 528 |

CHAPITRE 21 Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques..... 531

| | |
|--|-----|
| 1. La concentration du rayonnement solaire..... | 532 |
| 1.1. Architecture du champ solaire..... | 532 |
| 1.2. Matériaux utilisés pour la fabrication des miroirs..... | 532 |
| 1.3. Structure support..... | 535 |
| 1.4. La poursuite du Soleil..... | 539 |
| 1.5. Tubes récepteurs..... | 541 |
| 1.6. La mobilité des ensembles collecteurs : tubes flexibles ou joints à rotule..... | 543 |
| 1.7. Fluide caloporteur..... | 546 |
| 2. Performance des collecteurs cylindro-paraboliques..... | 546 |
| 2.1. Le rendement optique du collecteur..... | 550 |
| 2.2. Les pertes thermiques..... | 550 |
| 2.3. Le rendement global du collecteur..... | 555 |
| 3. Cycle thermodynamique..... | 557 |
| 3.1. Cycle de Hirn à récupération..... | 558 |
| 3.2. L'ajout d'une chaudière auxiliaire..... | 558 |
| 4. L'hybridation..... | 561 |
| 4.1. Hybridation solaire des centrales thermiques à flamme..... | 561 |
| 4.2. L'hybridation des centrales à charbon..... | 562 |
| 4.3. L'hybridation des centrales à cycle combiné au gaz (CCG)..... | 564 |
| 5. Stockage thermique..... | 567 |
| | 569 |

CHAPITRE 22 Les centrales à tour..... 571

| | |
|--|-----|
| 1. Principe de fonctionnement..... | 571 |
| 1.1. Le champ solaire..... | 571 |
| 1.2. Les héliostats..... | 572 |
| 1.3. Fluides caloporteurs..... | 573 |
| 2. Performance du champ d'héliostats..... | 574 |
| 2.1. Réflectance des miroirs..... | 588 |
| 2.2. Effet cosinus..... | 589 |
| 2.3. Pertes géométriques par ombrage et blocage..... | 589 |
| 2.4. Pertes liées à l'atténuation atmosphérique..... | 590 |
| 2.5. Pertes par débordement..... | 590 |
| 2.6. Rendement optique total..... | 592 |
| 3. Cycles thermodynamiques..... | 592 |
| | 592 |

CHAPITRE 23 Le stockage thermique..... 595

| | |
|---|-----|
| 1. La physique du stockage thermique et les matériaux utilisés..... | 595 |
| 1.1. Stockage par chaleur sensible..... | 596 |
| 1.2. Stockage par chaleur latente..... | 596 |
| 1.2.3. Conception du système..... | 599 |
| 1.3. Stockage thermochimique..... | 601 |
| 2. Typologie du stockage thermique..... | 602 |
| | 607 |

3. Systèmes de stockage : état de l'art et innovations..... 608

| | |
|---|-----|
| 3.1. Choix du milieu de stockage et de la configuration du système..... | 608 |
| 3.2. Cas des centrales à cycle de Hirn avec une boucle de sel fondu..... | 610 |
| 3.2.2. Cuve thermocline : stockage dual solide-liquide..... | 612 |
| 3.3. Cas des centrales à cycle de Hirn avec une boucle d'huile thermique..... | 615 |
| 3.4. Cas des centrales à production directe de vapeur..... | 617 |
| 3.5. Cas des centrales à cycle de Brayton (air ou s-CO ₂)..... | 629 |
| 4. Les stratégies d'exploitation du stockage thermique..... | 632 |
| 4.1. Stockage tampon..... | 632 |
| 4.2. Extension de la période de fonctionnement de la centrale..... | 633 |
| 4.3. Déplacement de la période de production..... | 638 |

BIBLIOGRAPHIE..... 641