

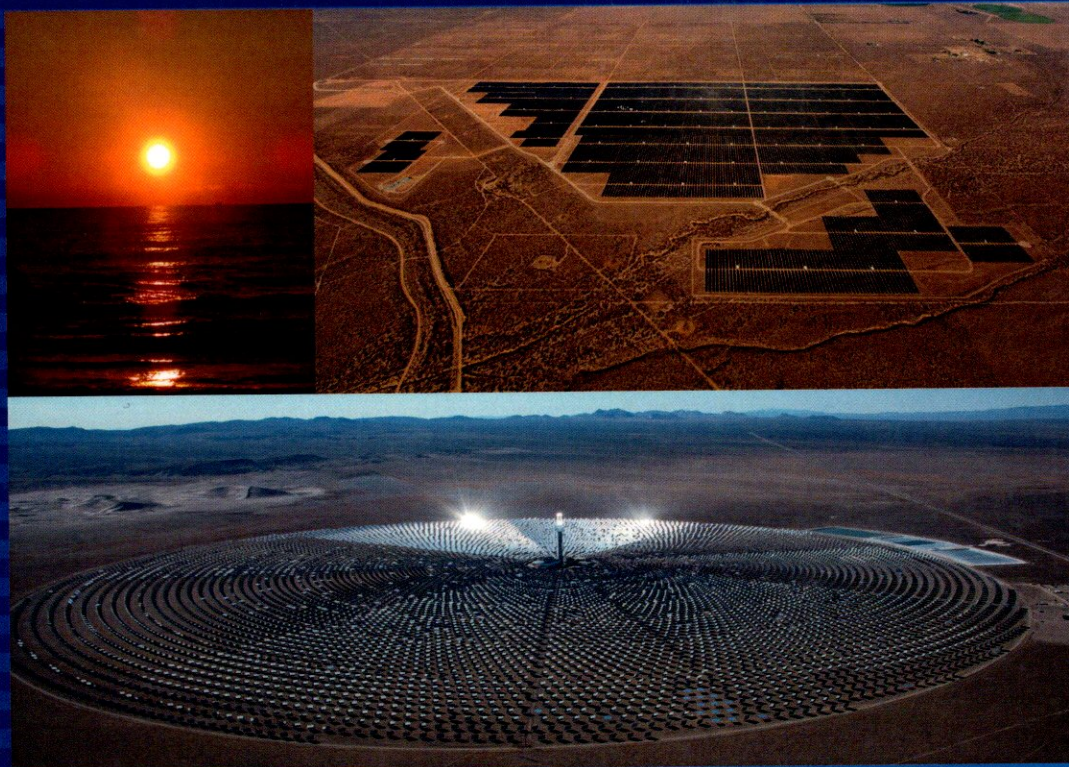
 **edf** COLLECTION EDF R&D

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 éclipitiques 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.....	511
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