

L'énergie solaire

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

Robert Soler



Dans la collection EDF R&D

Événements naturels extrêmes : théorie statistique et mitigation du risque

N. Bousquet, P. Bernardara, 2018

Électrotechnique des centrales nucléaires

C. Schroeder, 2018

Confinement des turbomachines

L. J. Randrianarivo, 2018

La Maintenance des centrales nucléaires

J.-P. Hutin, 2016

Efficacité énergétique – Des principes aux réalités

P. Baudry, 2016

Les Nanomatériaux et leurs applications pour l'énergie électrique

D. Noël, 2014

Guide international du comptage intelligent

F. Toledo, 2012

Numériser le travail – Théories, méthodes, expérimentations

S. Lahlou, V. Nosulenko, E. Samoylenko, 2012

L'Énergie hydraulique, 2^e édition

R. Ginocchio, P.-L. Viollet, 2012

*Le Système nerveux du réseau français de transport d'électricité (1946-2006) :
60 années de contrôle électrique*

J. Lecouturier, 2012

La Physique des réacteurs nucléaires

S. Marguet, 2011

Marketing critique : le consommateur collaborateur en question

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, A. Bonnemaizon, 2010

Graphes et algorithmes

M. Gondran, M. Minoux, 2009

*Gestion de la complexité dans les études quantitatives de sûreté
de fonctionnement des systèmes*

M. Bouissou, 2008

Calcul de champ électromagnétique : exemples d'application

J.-C. Vérité, J.-P. Ducreux, G. Tanneau, P. Baraton, B. Paya, 2007

*Les Télécommunications au cœur du système électrique français
(1946-2000)*

A. Giandou, C. Leclère, J. Lecouturier, J.-M. Spetebroodt, H. Thibert, A. Vilatte, 2007

Innover en marketing, 15 tendances en mouvement

B. Cova, M. Louyot-Gallicher, 2006

Éléments finis pour l'ingénieur : grands principes et petites recettes

P. Thomas, 2006

Évaluation et maîtrise du vieillissement industriel

A. Lannoy, H. Procaccia, 2005

L'énergie solaire

**des fondamentaux aux technologies
d'aujourd'hui et de demain**

Robert Soler

Préface de Cédric Philibert

Direction éditoriale : Jean-Marc Bocabeille

Mise en pages : Nord Compo

Photos de couverture

Photos :

- L'aube à Misano Adriatico, Rimini, Italie (CdA)
- Centrale photovoltaïque de Catalina Solar, à Rosamond, Californie (© EDF/ Frédéric Neema].
- Centrale solaire thermodynamique de Crescent Dunes, à Tonopah, Nevada, États-Unis (© SolarReserve)

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'éclairage solaire au sommet de l'atmosphère terrestre	21
4.1. L'éclairage solaire total (TSI)	21
4.2. Un exemple de formule approchée de l'éclairage 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 composantes 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 composantes 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	35
4. La modélisation des conditions de ciel clair.....	37
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.....	40
CHAPITRE 4 La mesure du rayonnement au sol.....	43
1. La sélection d'un site d'implantation d'un projet solaire.....	44
2. La mesure radiométrique sur site	45
2.1. Les radiomètres à thermopile	46
2.2. Les stations de mesures radiométriques à trois composants.....	50
2.3. Quelques alternatives aux stations de mesure à trois composants.....	51
2.4. Mesure de l'éclairement en fonction de la longueur d'onde avec un spectroradiomètre	54
3. Les réseaux de stations de mesure au sol.....	54
4. Le traitement d'images satellitaires	56
4.1. Le système d'observation de l'atmosphère terrestre	57
4.2. Bases de données issues du traitement d'images satellitaires	60
5. L'année météorologique typique (TMY, typical meteorological year) ..	61
6. Caractérisation de la variabilité de la ressource solaire.....	63
6.1. Variabilité de court terme	63
6.2. Variabilité interannuelle	64
6.3. Variabilité de long terme	64
6.4. Variabilité spatiale	65
7. Prévoir le rayonnement solaire.....	68
CHAPITRE 5 Le mouvement apparent du soleil.....	71
1. Le globe terrestre et les coordonnées géographiques : latitude et longitude	72
2. La relation terre-soleil	72
2.1. L'orbite terrestre.....	72
2.2. Les perturbations de l'orbite terrestre	74
2.3. La sphère céleste et le mouvement apparent du soleil.....	76
3. La mesure du temps	77
3.1. La mesure des années et des jours.....	77
3.2. 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 écliptiques 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	102
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	115
1. La position du Soleil par rapport à une surface inclinée	116
1.1. Le calcul de l'angle d'incidence	116
1.2. Trois cas particuliers	117
2. La poursuite du Soleil (Tracking).....	118
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	127
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

2.4. L'ensoleillement global	140
3. L'impact de l'utilisation des systèmes de poursuite du Soleil sur le rayonnement collecté	141
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	159
1. Structure cristalline des semi-conducteurs usuels utilisés pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.....	159
1.1. Réseaux cristallins	159
1.2. Réseau réciproque	166
1.3. Les plans réticulaires dans le réseau cristallin.....	168
1.4. Les zones de Brillouin d'un réseau réciproque.....	175
2. Le diagramme de bandes	178
2.1. Qu'est-ce qu'un diagramme de bandes ?	178
2.2. La formation des bandes d'énergie selon la méthode LCAO.....	179
2.3. La formation des bandes d'énergie selon la théorie des bandes.....	183
2.4. Nombre d'états électroniques dans une bande	195
3. Pourquoi un semi-conducteur permet la conversion photovoltaïque du rayonnement solaire ?	196
3.1. Métaux, isolants et semi-conducteurs	196
3.2. Les types de bandes interdites des semi-conducteurs.....	199
3.3. Les semi-conducteurs utilisés pour la conversion photovoltaïque.....	200
4. L'approche semi-classique : notion de masse effective	201
4.1. Masse effective des électrons	201
4.2. Vitesse des électrons	203
4.3. Les trous	204
4.4. Densité d'états et masses effectives de densité d'états.....	205
5. Nombre total de porteurs dans un semi-conducteur cristallin	209
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	211

CHAPITRE 10 Dopage des semi-conducteurs et transport de charges	213
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	 239
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	 257
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 I(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.....	305
1. La filière silicium cristallin.....	306
1.1. La métallurgie du silicium.....	307
1.2. L'élaboration des cellules.....	318
1.3. Les voies d'amélioration.....	332
1.4. La mise en module.....	340
2. La filière « couches minces » (CdTe et CIGS).....	341
2.1. Les chalcopyrites (CIGS).....	341
2.2. Les cellules en couches minces de tellure de cadmium (CdTe).....	351
3. Les systèmes photovoltaïques sous concentration.....	355
3.1. Les mécanismes de pertes dans les cellules solaires.....	355
3.2. Architecture et rendement des multi-jonctions.....	357
3.3. L'augmentation du rendement sous concentration.....	360
3.4. Typologie des systèmes à concentration.....	362
4. Perspectives de ruptures technologiques à moyen et long terme.....	364
4.1. Les architectures avancées à très haut rendement.....	364
4.2. Les cellules organiques.....	367
4.3. Les cellules photovoltaïques à pérovskites.....	371

CHAPITRE 14 Modules, générateurs et systèmes photovoltaïques	375
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	393
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 du stockage.....	417
3.3. Estimer la puissance crête du champ photovoltaïque.....	418
CHAPITRE 16 Les installations raccordées au réseau	421
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 thermosolaire	479
5. Un nouvel essor au ^{xxi} 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	509
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	535
1.3. Structure support.....	539
1.4. La poursuite du Soleil	541
1.5. Tubes récepteurs.....	543
1.6. La mobilité des ensembles collecteurs : tubes flexibles ou joints à rotule.....	546
1.7. Fluide caloporteur	546
2. Performance des collecteurs cylindro-paraboliques.....	550
2.1. Le rendement optique du collecteur	550
2.2. Les pertes thermiques.....	555
2.3. Le rendement global du collecteur	557
3. Cycle thermodynamique	558
3.1. Cycle de Hirn à récupération	558
3.2. L'ajout d'une chaudière auxiliaire.....	561
4. L'hybridation.....	561
4.1. Hybridation solaire des centrales thermiques à flamme	562
4.2. L'hybridation des centrales à charbon.....	564
4.3. L'hybridation des centrales à cycle combiné au gaz (CCG).....	567
5. Stockage thermique	569
CHAPITRE 22 Les centrales à tour	571
1. Principe de fonctionnement.....	571
1.1. Le champ solaire	572
1.2. Les héliostats	573
1.3. Fluides caloporteurs	574
2. Performance du champ d'héliostats.....	588
2.1. Réflectance des miroirs	589
2.2. Effet cosinus.....	589
2.3. Pertes géométriques par ombrage et blocage	590
2.4. Pertes liées à l'atténuation atmosphérique	590
2.5. Pertes par débordement.....	592
2.6. Rendement optique total	592
3. Cycles thermodynamiques	592
CHAPITRE 23 Le stockage thermique.....	595
1. La physique du stockage thermique et les matériaux utilisés	596
1.1. Stockage par chaleur sensible	596
1.2. Stockage par chaleur latente	599
1.2.3. Conception du système.....	601
1.3. Stockage thermochimique	602
2. Typologie du stockage thermique	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

Préface

« La vedette incontestée de l'année, c'est le solaire photovoltaïque, dont la capacité nette a pour la première fois crû davantage que tous les autres combustibles, et notamment plus que le charbon ». C'est par ces mots que le directeur exécutif de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), Fatih Birol, introduisait, en octobre 2017, la présentation du rapport de son agence sur les perspectives de marché des énergies renouvelables. Et de fait, la capacité photovoltaïque (PV) installée au cours de l'année 2016 s'est accrue de 74 gigawatts (GW, ou milliers de mégawatts) en 2016, moitié plus que l'année précédente, elle-même considérée alors comme un record, loin devant l'éolien terrestre (52 GW), l'hydroélectricité (32 GW), la bioélectricité (6.6 GW) et la géothermie (350 MW). Et si le PV ouvre la marche, le solaire thermodynamique à concentration (CSP) arrive bon dernier (270 MW).

Et ce n'est que le début pour le photovoltaïque. Malgré son succès récent, la production d'électricité solaire ne représente encore qu'environ 1,5 % de la production mondiale d'électricité – 312 terawattheures (TWh – milliards de kilowattheures) pour le PV et 13 TWh pour le CSP en 2016. Autant dire que sa marge de progression reste très importante. Et pour l'instant, dans la très grande majorité des cas, la fameuse variabilité de sa production n'est simplement pas un problème.

L'AIE anticipe que le PV atteindra une capacité mondiale entre 740 et 880 GW en 2022, contre à peine plus de 300 GW à fin 2016. La Chine puis l'Inde fourniront les gros bataillons de ces capacités nouvelles, dont près de 60 % seront installées au sol dans de grandes installations. Poussée principalement par la croissance de l'éolien et du PV, la génération d'électricité renouvelable se détachera plus nettement de celle due au gaz naturel, sans pouvoir déjà rejoindre celle du charbon. Au-delà, aux horizons 2030 à 2060, il n'y a plus de prévisions mais des scénarios, et ceux de l'AIE sont régulièrement révisés à la hausse devant la poussée continue du PV, la baisse précipitée de ses coûts, l'amélioration de son efficacité, et l'intérêt toujours plus important que lui témoignent les décideurs politiques – gouvernements, parlementaires, exécutifs régionaux ou municipaux – et d'entreprises. Qu'il s'agisse de réduire la pollution urbaine, de réduire les émissions de CO₂, d'améliorer la sécurité énergétique ou l'accès à l'énergie, le PV apparaît de plus en plus comme un outil capital, dont l'incroyable adaptabilité permet de répondre à une multiplicité de besoins, du milliwatt de votre calculette au presque gigawatt de la centrale chinoise de Longyangxia Dam en passant par les toits solaires australiens ou belges¹ et les millions de petits *solar home systems* dont bénéficient 20 millions de Bangladais, 12 % de la population du pays. Les grandes centrales au sol, parfois avec suivi du soleil sur un axe, peuvent déjà produire de l'électricité à 6 centimes d'euros le kWh en Europe – et même au Danemark – et moins de 3 US cents le kWh dans les zones du globe les plus ensoleillées. Cette rapide évolution économique a conduit la France depuis 2009 à quintupler ses ambitions solaires à l'horizon 2020, et son opérateur historique, Électricité de France, à annoncer en décembre 2017 son intention de développer lui-même 30 GW de PV à

1. Ces pays sont numéros 1 et 2 pour le pourcentage de maisons équipées en toits solaires.

l'horizon 2035 par le truchement des appels d'offres, misant donc implicitement sur un objectif gouvernemental à cet horizon d'au moins le double.

Jusqu'où ira cette croissance ? Dès 2011, l'AIE a envisagé que le solaire puisse devenir non seulement la principale source d'électricité de l'humanité, mais même sa première source d'énergie². Ce qui ne va pas de soi, s'agissant d'une énergie qui n'est disponible en tout point de la surface du globe que durant la moitié du temps... Au mieux ! En pratique, il semble qu'il ne faille pas espérer une production supérieure à un fonctionnement équivalent à pleine puissance d'environ 3 000 heures par an (sur 8 760) dans l'endroit le plus ensoleillé du globe, le désert d'Atacama au Chili. Dans de nombreuses régions du globe, d'autres énergies renouvelables fourniront très vraisemblablement davantage d'énergie que le solaire : en Europe occidentale, parce que la demande d'électricité est plus forte en hiver quand l'éolien produit le plus ; et même peut-être en Amérique latine, non que le soleil manque mais parce que les ressources de l'hydraulique sont considérables. À cette exception près, dans la plupart des pays bien ensoleillés le photovoltaïque devrait dominer le mix électrique à terme, tiré notamment par la demande de climatisation, et sans doute complété notamment par l'hydroélectricité dans les zones équatoriales humides, et par... le solaire thermodynamique à concentration (ou CSP, voire STE, abréviations de *Concentrating Solar Power* et de *Solar Thermal Electricity*).

Sous des cieux clairs dans les pays chauds et secs (donc à forte insolation directe), le CSP complète en effet idéalement le PV. Grâce au stockage thermique il est bien placé pour produire de l'électricité solaire après le coucher du soleil. Aujourd'hui, dans nombre de pays, c'est le soir que la demande d'électricité est maximale, et sa valeur la plus grande. Plus tard, quand le processus de décarbonisation de la production d'électricité s'approchera de son terme, il faudra aussi produire avec des renouvelables l'électricité de la seconde partie de la nuit, quand sa demande est minimale et sa valeur la plus faible. Ce que préfigure déjà l'appel d'offres de la Dubai Electricity and Water Authority, pour une production solaire thermodynamique de 16 heures à 10 heures, remporté par la firme saoudienne ACWA Power au prix de 7,3 US cents par kWh pour une centrale de 700 MW au total, en quatre turbines.

On le voit : le défi de la variabilité du solaire, tout comme celle du vent, appelle un ensemble de réponses plutôt complexes, dont la première est sans doute un développement réfléchi des renouvelables, combinant celles qui peuvent être actionnées à volonté avec celles dont la disponibilité dépend des facteurs météorologiques, combinant également productions décentralisées et centralisées, dans des proportions qui dépendront naturellement des ressources mais tout autant des variations quotidiennes ou saisonnières de la demande d'électricité. La deuxième réside dans la gestion de la demande, un levier également très important quoique encore peu mis en œuvre. Par exemple, pourquoi ne pas utiliser l'électricité photovoltaïque pour fabriquer de la glace en milieu de journée, dont la fonte progressive répondra aux besoins de rafraîchissement nocturnes avec une consommation minimale ? La troisième réponse est sans conteste le développement des réseaux et des interconnexions, qui permettent de mieux « lisser » les

2. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Solar_Energy_Perspectives2011.pdf

productions variables, et de mieux utiliser les capacités fermes, hydrauliques ou thermiques. Bref, le stockage de l'électricité, s'il sera nécessaire en bien plus grandes quantités qu'aujourd'hui – à peu près 150 GW presque exclusivement grâce aux stations de transfert d'électricité par pompage –, n'est nullement l'alpha et l'oméga de l'intégration des renouvelables variables, mais un outil parmi d'autres.

Au-delà de la consommation actuelle d'électricité, qui plafonne dans les pays industrialisés, s'ouvrent de nouveaux et vastes horizons pour les énergies renouvelables en général, et en particulier celles du soleil. La nécessaire décarbonisation de nos économies, la réduction des polluants atmosphériques autant que la quête d'une sécurité énergétique accrue conduiront inéluctablement à une forte accélération du rythme d'électrification du mix énergétique. Les transports, la chaleur, les procédés industriels vont devoir abandonner les combustibles fossiles. Et pour cela, aux côtés des énergies renouvelables thermiques, en progrès mais qui se heurtent à des barrières difficiles à éliminer, il leur faudra se tourner vers des procédés électriques.

Parmi ceux-ci, l'électrochimie prendra une place grandissante en ouvrant la voie d'abord à une production sans émissions polluantes de l'hydrogène indispensable à nombre d'industries – fertilisants azotés, raffineries et autres ; puis à de nouveaux usages industriels de l'hydrogène tels que la réduction directe du minerai de fer, ou d'autres applications de l'électrolyse pour traiter d'autres matériaux essentiels ; enfin à des usages énergétiques de l'hydrogène pour seconder les batteries d'accumulateurs dans un certain nombre de situations.

Mais nous n'en sommes pas tout à fait là. L'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie solaire thermodynamique à concentration ont connu des progrès remarquables mais ont encore beaucoup de chemin à parcourir. Dans ce contexte, le livre de Robert Soler vient à propos pour fournir aux chercheurs, aux ingénieurs et aux techniciens toutes les clés, les ressorts scientifiques de ces techniques. Et ce n'est pas le moindre mérite de ce livre savant, parfois ardu mais toujours juste et pointu, que d'associer dans un même volume deux familles technologiques qui utilisent certes la même source d'énergie, encore que pas tout à fait, mais surtout dont les bases scientifiques et industrielles sont très différentes – et que nous devons pourtant apprendre à associer au mieux pour répondre aux exigences énergétiques et environnementales d'aujourd'hui et de demain.

Cédric Philibert
Agence internationale de l'énergie,
division des énergies renouvelables

Avant-Propos

Cet ouvrage est l'aboutissement de plus de vingt années de travaux menés au sein d'EDF Recherche et Développement dans le domaine de l'énergie solaire pour la production d'électricité. Ces activités m'ont conduit au fil du temps à m'investir dans l'électrification rurale dans les pays en développement, les procédés de fabrication des cellules photovoltaïques, la mise en œuvre de systèmes et de centrales photovoltaïques et pour finir les technologies solaires thermodynamiques à concentration.

Les hasards du calendrier font que cette première édition s'inscrit dans l'actualité du Groupe EDF qui vient d'annoncer successivement le lancement d'un « plan solaire » et d'un « plan stockage » destinés à accompagner la transition énergétique en France. Le plan solaire a pour ambition de développer et construire 30 GW d'installations photovoltaïques en France entre 2020 et 2035. La mise en œuvre devrait marquer un tournant dans le développement de la filière française dans la mesure où le volume concerné représente environ quatre fois les capacités installées sur le territoire français à fin 2018. Le plan stockage, pour sa part, prévoit le déploiement de 10 GW de capacités de stockage d'électricité dans le monde dans la même période et contribuera de facto à une meilleure intégration des énergies renouvelables variables comme le photovoltaïque dans le système électrique, à favoriser l'autoconsommation et à offrir de nouvelles solutions pour l'accès à l'électricité dans les pays en développement.

L'ouvrage se veut une synthèse des fondamentaux de la conversion de l'énergie solaire et des technologies de production d'électricité photovoltaïque et solaire thermodynamique. Il doit en grande partie sa structure aux cours que je dispense sur ces sujets à CentraleSupélec et à l'Institut National des Sciences et Techniques du Nucléaire (INSTN). Il s'adresse aux ingénieurs et aux chercheurs, aux étudiants de niveau Master et de Grandes Écoles, ainsi qu'à toute personne désireuse de découvrir les bases scientifiques du domaine de l'énergie solaire.

La première partie du livre est consacrée à « la ressource ». Elle suit un cheminement partant des réactions thermonucléaires de fusion au sein du Soleil qui sont responsables de son rayonnement jusqu'à la détermination de l'énergie utile qui peut être collectée par une surface au sol, module photovoltaïque ou collecteur solaire thermodynamique, à partir des positions respectives du Soleil et de la surface.

Une deuxième partie est consacrée à la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire. Après un survol historique de l'essor de la filière, le texte aborde la physique des cellules solaires, les procédés de fabrication des modules photovoltaïques, les différents types de systèmes et, pour finir, les enjeux pour un producteur d'électricité photovoltaïque liés à l'intégration de sa production variable dans le système électrique.

La troisième et dernière partie traite des technologies solaires thermodynamiques à concentration et aborde en détail le fonctionnement des centrales cylindro-paraboliques et des centrales à tour ainsi que du stockage thermique qui est une spécificité de cette filière.

La recherche dans le domaine de l'énergie solaire évoluant à un rythme soutenu, je me suis attaché à décrire l'état de l'art et les principales

innovations envisagées à court et moyen terme. Je me suis également efforcé d'apporter de façon systématique les développements scientifiques nécessaires à la pleine compréhension du sujet.

Ce livre n'aurait pu être réalisé dans sa forme présente sans le précieux concours de nombreuses personnes qui m'ont apporté aide et soutien pendant la rédaction et auxquelles j'exprime ici ma sincère gratitude.

Je remercie en premier lieu celui qui m'a confié ce travail et m'a ainsi permis de vivre une aventure passionnante, Pierre-Louis Viollet.

Je remercie chaleureusement tous les collègues qui ont accepté de consacrer du temps pour relire une des parties de l'ouvrage et qui m'ont apporté des commentaires éclairés et des suggestions : Richard Perez (University at Albany, NY, USA) et Lucien Wald (MINES ParisTech) pour la partie sur la ressource solaire, Jean-François Guillemoles (CNRS-IPVF), Abdelilah Slaoui (CNRS-INSIS), Julien Dupuis (EDF R&D), Khalid Radouane (EDFR), Guy Schweitz (EDF R&D) et Vincent Gabrion (EDF R&D) pour la partie sur le photovoltaïque, Jean-Jacques Bezian (École des Mines d'Albi) et Gilles Flamant (CNRS-Promes) pour la partie consacrée au solaire thermodynamique et, bien sûr, Cédric Philibert (Agence Internationale de l'Énergie) qui a accepté de préfacer l'ouvrage.

D'autres collègues ont également contribué à ce travail par leurs conseils : Camille Zakhour (EDF), Pierre-Philippe Grand (EDF R&D), Cédric Broussillou (Photowatt), Sébastien Arondel (EDFR) et Veronica Bermudez (QEERI).

Je suis reconnaissant à tous les collègues, entreprises et instituts qui m'ont permis d'utiliser à titre d'illustration des photos, documents ou autres matériels scientifiques leur appartenant.

Je remercie également mon épouse Béatrice pour son soutien et sa relecture attentive de morceaux choisis de l'ouvrage.

Enfin, j'adresse une pensée particulière à Paul Baudry et Marc Trotignon avec qui j'ai partagé de longs moments d'écriture et d'amitié lors de mises au vert pour l'élaboration de nos ouvrages respectifs.

Robert Soler est chercheur sénior à EDF R&D. Il est ingénieur de l'INSA de Lyon et a vingt ans d'expérience dans le domaine de l'énergie solaire au cours desquels il a été amené à coordonner des projets relatifs à l'électrification rurale dans les pays en développement, aux procédés de fabrication des cellules photovoltaïques, à la mise en œuvre des systèmes et centrales photovoltaïques et à la production solaire thermodynamique. Il enseigne cette discipline à CentraleSupélec, l'INSTN (Institut National des Sciences et Techniques du Nucléaire) et l'IFP School.

L'énergie solaire - Des fondamentaux aux technologies d'aujourd'hui et de demain

Les technologies de production d'électricité à base d'énergie solaire connaissent un développement soutenu depuis une vingtaine d'années. Ce développement est lié à un fort engouement pour les énergies renouvelables dans un contexte mondial de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Il est la conséquence de politiques volontaristes mises en place par les pouvoirs publics dans de nombreux pays dès la fin des années 90. Le déploiement à grande échelle de ces technologies a conduit, ces dernières années, à des baisses substantielles de coût de production et à des progrès remarquables sur le plan des performances en raison d'efforts de recherche très importants en forte synergie avec l'industrie. Cette situation augure de belles perspectives pour l'avenir de ces filières à moyen et long terme. En France, le Gouvernement a dévoilé, en 2018, le plan « Place au Soleil » constitué d'une série de mesures qui contribueront à atteindre une cible de 32 % d'énergies renouvelables dans la consommation brute finale d'énergie en 2030.

Cet ouvrage a pour principal objectif d'offrir au lecteur un panorama complet de la production d'électricité photovoltaïque et solaire thermodynamique : fondamentaux, état de l'art, principales innovations envisagées à court et moyen terme. Des développements scientifiques détaillés ont été apportés chaque fois que nécessaires à la pleine compréhension du sujet.

Ce livre s'adresse aux étudiants de niveau Master, aux élèves ingénieurs ainsi qu'aux ingénieurs et chercheurs travaillant ou souhaitant travailler dans le domaine de l'énergie solaire. Il est également recommandé à toute personne désireuse de découvrir et de s'approprier ce sujet.

