

Table des matières

Introduction	1
Abdelilah SLAOUI et Jean-François GUILLEMOLES	
Chapitre 1. Histoire du photovoltaïque	9
Daniel LINCOT	
1.1. Introduction	9
1.2. Le solaire thermique	10
1.3. Les découvertes	11
1.3.1. La découverte de l'effet photovoltaïque et son contexte	11
1.3.2. De la découverte de la photoconductivité dans le sélénium aux premiers modules photovoltaïques	14
1.3.3. Découverte de l'effet photoélectrique dans le vide et de l'électronique à lampe	15
1.3.4. Le détour du photovoltaïque par les « moustaches de chats » et la découverte de la jonction p-n	16
1.4. L'épopée du silicium	17
1.5. La question du rendement et l'essor de la physique du solide	21
1.6. Le tournant des applications terrestres et le changement de contexte politique	24
1.7. La diversification des filières photovoltaïques	26
1.8. Le nouvel élan du photovoltaïque	27
1.9. Conclusion	28
1.10. Bibliographie	29

Chapitre 2. Principes de la conversion photovoltaïque	35
Arthur JULIEN, Marie LEGRAND et Jean-François GUILLEMOLES	
2.1. Introduction	35
2.2. Thermodynamique de la conversion de l'énergie solaire	36
2.2.1. Limite solaire	36
2.2.2. Analyse thermodynamique de la conversion	38
2.3. Limitations liées à l'optique et modèle de Shockley-Queisser	41
2.3.1. Propriétés optiques et électroniques des semi-conducteurs	42
2.3.2. Description schématique de la conversion photovoltaïque	45
2.3.3. Principe du bilan détaillé	49
2.3.4. Diode simple	50
2.3.5. Rendement quantique d'émission et réciprocité optoélectronique PV/LED	55
2.4. Transport électronique dans les cellules solaires	57
2.4.1. Phénomènes principaux pour le comportement des électrons et trous dans un semi-conducteur	57
2.4.2. Jonction p-n	63
2.4.3. Collecte des photo-porteurs	65
2.4.4. Caractéristique courant-tension	66
2.4.5. Impact des propriétés de semi-conducteur sur la caractéristique courant-tension	69
2.5. Conclusion : comment réaliser une bonne cellule solaire avec les matériaux existants ?	73
2.6. Bibliographie	76
Chapitre 3. Photovoltaïque silicium	79
Alain FAVE, Erwann FOURMOND, Mohamed AMARA, Fabien MANDORLO et Mustapha LEMITI	
3.1. La filière photovoltaïque silicium	79
3.1.1. Extraction et réduction du silicium	80
3.1.2. Purification du silicium	81
3.1.3. Cristallisation du silicium	83
3.1.4. Découpe du silicium	87
3.2. Le silicium en couche mince	89
3.2.1. Le silicium polycristallin	89
3.2.2. Report de film mince de silicium monocristallin	91
3.2.3. Le silicium amorphe et microcristallin	92
3.3. Structure et principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin	94
3.3.1. Collecte des paires électroniques	94

3.3.2. Caractéristiques I-V et modèles électriques.	95
3.3.3. Performances électriques et rendement de conversion	97
3.4. Facteurs physiques limitant le rendement de conversion énergétique. . .	98
3.4.1. Source de pertes technologiques dans les cellules photovoltaïques à base de silicium.	99
3.4.2. Performance de collecte des porteurs photogénérés.	105
3.5. Technologie des cellules en silicium cristallin	115
3.5.1. Technologie Al-BSF	115
3.5.2. Cellules à émetteur passivé et contact arrière (PERC)	119
3.5.3. Cellules à contact arrière interdigitées (IBC).	123
3.5.4. Cellules à hétérojonction de silicium	128
3.6. Modules photovoltaïques.	131
3.6.1. Caractéristiques électriques des cellules et modules solaires . . .	131
3.6.2. Assemblage des cellules	132
3.6.3. Encapsulation	134
3.6.4. Rendement et puissance crête des modules.	134
3.7. Rendement énergétique en conditions réelles (<i>Energy Yield</i>)	137
3.7.1. Production électrique annuelle des modules	137
3.7.2. Effet de la température	140
3.8. Bibliographie.	143

Chapitre 4. Photovoltaïque en couches minces : filiales industrielles (CIGSSe)

157

Negar NAGHAVI FLEURY et Nicolas BARREAU

4.1. Introduction.	157
4.1.1. Généralités sur le CIGSSe et cellules solaires associées	157
4.1.2. Cu(In,Ga)Se_2 ou Cu(In,Ga)S_2 ?	161
4.2. Focus sur certains travaux menés dans le cadre national	163
4.2.1. Cellules à base de large bande interdite pour la réalisation de cellules tandem	163
4.2.2. Les cellules solaires flexibles	164
4.2.3. Les cellules solaires ultraminces	169
4.3. Conclusions et perspectives	173
4.4. Bibliographie.	173

Chapitre 5. Cellules solaires organiques : état de l'art et perspectives

179

Nicolas LECLERC et Patrick LÉVÊQUE

5.1. Introduction.	179
5.2. Principe de fonctionnement	180

5.3. Morphologie de la couche active	182
5.4. Niveaux d'orbitales frontières et tension en circuit ouvert	185
5.5. Gamme d'absorption et densité de courant en court-circuit	187
5.6. État de l'art du photovoltaïque organique	190
5.7. Conclusion	195
5.8. Bibliographie	195

Chapitre 6. Cellules à colorant : état de l'art et perspectives 199

Thierry TOUPANCE, Ludmila COJOCARU et Johann BOUCLÉ

6.1. Introduction	199
6.2. Principe d'une cellule solaire à colorant : photosensibilisation d'un oxyde métallique semi-conducteur	200
6.3. Optimisation des différents constituants d'une cellule à colorant : état de l'art	202
6.3.1. Les oxydes semi-conducteurs	202
6.3.2. Les colorants	203
6.3.3. Les électrolytes	205
6.3.4. Passage aux électrolytes quasi-solides et solides	207
6.4. Les applications des DSSC	210
6.5. Perspectives	212
6.6. Bibliographie	212

Chapitre 7. Filières couches minces : pérovskites hybrides halogénées 219

Emmanuelle DELEPORTE, Sylvain VEDRAINE, Johann BOUCLÉ
et Lionel HIRSCH

7.1. Introduction	219
7.2. Les pérovskites halogénées et leurs propriétés opto-électroniques	220
7.2.1. Des procédés de fabrication par voie liquide permettant d'imprimer les cellules solaires	221
7.2.2. Des propriétés physiques bien adaptées pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique	223
7.3. Cellules solaires à base de pérovskites hybrides halogénées	226
7.3.1. Principes de base et performances	226
7.3.2. Stratégies d'amélioration des performances	229
7.3.3. Stabilité des cellules solaires à base de pérovskite	236
7.4. Perspectives	242
7.4.1. Augmenter la surface active, vers des grandes surfaces	242
7.4.2. Au-delà de la limite de Shockley-Queisser ?	242

7.5. Conclusion	243
7.6. Bibliographie	244

Chapitre 8. Photovoltaïque en couches minces :

filières émergentes	257
--------------------------------------	------------

Thomas FIX et Abdelilah SLAOUI

8.1. Introduction	257
8.2. Clathrates de silicium	259
8.2.1. Intérêt des clathrates de silicium	259
8.2.2. Bref historique des clathrates de silicium	261
8.2.3. Synthèse des clathrates de silicium	261
8.2.4. Dispositifs	263
8.3. ZnSnN ₂ et composés dérivés.	264
8.3.1. Intérêt du matériau ZnSnN ₂	264
8.3.2. Bref historique.	265
8.3.3. Propriétés structurales et électroniques	265
8.3.4. Dispositifs	267
8.3.5. Absorbeur Zn ₃ P ₂	268
8.3.6. Absorbeur ZnSnP ₂	268
8.4. Couches minces d'oxydes absorbeurs	268
8.4.1. Intérêt des oxydes absorbeurs	268
8.4.2. Absorbeur Cu ₂ O	270
8.4.3. Autres oxydes absorbeurs	271
8.4.4. Absorbeur à base d'oxydes ferroélectriques	272
8.5. Sulfures et séléniures	275
8.5.1. Absorbeur Sb ₂ Se ₃	275
8.5.2. Absorbeur PbSe	276
8.5.3. Absorbeur SnS	279
8.6. Absorbeurs BiI ₃ et BiOI	281
8.6.1. Intérêt du matériau	281
8.6.2. Synthèse	281
8.6.3. Dispositifs	281
8.7. Conclusions.	282
8.8. Bibliographie	282

Chapitre 9. Technologies photovoltaïques tandem émergentes

Marie GUEUNIER-FARRET, James P. CONNOLLY, Aleksandra BOJAR,

Jean-Paul KLEIDER et Philip SCHULZ

9.1. Introduction	291
9.2. Cellules solaires multi-jonctions : principes de fonctionnement	294

9.3. Concepts et architectures de cellules solaires multi-jonctions 299

 9.3.1. Cellules tandem à 4 terminaux (4T) 299

 9.3.2. Cellules solaires tandem à deux terminaux (2T) 301

 9.3.3. Cellules solaires tandem à trois terminaux (3T) 304

9.4. Cellules solaires tandem à silicium et couches minces émergentes . . . 305

9.5. Développements futurs : vers des cellules solaires tandem
entièrement à couches minces et à faible coût 312

 9.5.1. Cellules solaires tandem à couches minces « émergentes » 312

 9.5.2. CIGS/*Perovskite Tandem Solar Cells* 314

 9.5.3. Cellules solaires tandem tout-pérovskite 317

9.6. Caractérisation avancée des cellules solaires tandem 319

9.7. Bibliographie 325

Chapitre 10. Concepts avancés pour une conversion photovoltaïque à très haut rendement 333
 Thomas VEZIN, Hamidreza ESMAIELPOUR, Mohamed AMARA
 et Daniel SUCHET

10.1. Limite de conversion d'une cellule solaire conventionnelle 334

 10.1.1. Rendements thermodynamiques 334

 10.1.2. Un premier modèle qualitatif : la limite de Trivich-Flinn 336

 10.1.3. Le modèle de bilan détaillé : la limite de Shockley-Queisser . . . 339

10.2. Concepts avancés pour la conversion à haut rendement 343

 10.2.1. Réduire les pertes dues à la non-absorption 345

 10.2.2. Réduire les pertes dues à la thermalisation 347

10.3. Vers des nouveaux concepts robustes 351

10.4. Bibliographie 355

Liste des auteurs 361

Index 365