



Etude, modélisation et optimisation de surfaces fonctionnelles pour les collecteurs solaires thermiques à concentration

Antoine Grosjean

► To cite this version:

Antoine Grosjean. Etude, modélisation et optimisation de surfaces fonctionnelles pour les collecteurs solaires thermiques à concentration. Autre. Université de Perpignan, 2018. Français. NNT : 2018PERP0002 . tel-04031542

HAL Id: tel-04031542

<https://theses.hal.science/tel-04031542>

Submitted on 16 Mar 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par
UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA

Préparée au sein de l'école doctorale :
Energie Environnement E²

Et de l'unité de recherche :
PROMES CNRS, UPR 8521

Spécialité :
Sciences pour l'ingénieur

Présentée par :
GROSJEAN Antoine

**Etude, modélisation et optimisation de
surfaces fonctionnelles pour les collecteurs
solaires thermiques à concentration**

Soutenue le jeudi 8 mars 2018 devant le jury composé de :

M. Éric TOMASELLA, Pr, ICCF-Université Clermont Auvergne

Rapporteur

M. Yves JOURLIN, Pr, LabHC-Université Jean Monnet

Rapporteur

M^{me}. Nolwenn LE PIERRES, MCF HDR, Université Savoie Mont
Blanc

Examinatrice

M. Gilles FLAMANT, Dr, PROMES-CNRS

Examineur

M^{me}. Myriam ZERRAD, IR HDR, Institut Fresnel-U. Aix-Marseille

Examinatrice

M. Laurent THOMAS, Pr, PROMES-UPVD

Directeur de thèse

M^{me}. Audrey SOUM-GLAUDE, IR, PROMES-CNRS

Directrice de thèse



“La phrase la plus excitante à entendre en science, celle qui annonce de nouvelles découvertes, n’est pas « Eureka », mais plutôt « Tiens, c’est marrant ça... » ”

Isaac Asimov

“One thing I feel sure of is that the human race must finally utilize direct sun power or revert to barbarism. I would recommend all far-sighted engineers and inventors to work in this direction to their own profit, and the eternal welfare of the human race. ”

Frank Shuman, scientifique américain, 1914

“ Il faut penser différemment, si on réfléchit comme on en a l’habitude, on n’arrive à rien. ”

Edmond Wells

Remerciements

Au moment d'écrire ces remerciements, une personne me vient tout de suite à l'esprit. Tout d'abord, mes remerciements les plus chaleureux sont pour ma compagne Mathilde. Un grand merci et un bravo pour ton soutien sans faille au cours de cette longue aventure et tout particulièrement au cours de ces derniers mois. Merci de m'avoir soutenu et d'avoir malgré toi partagé mes doutes et mes certitudes, mes moments d'allégresse et mes blues, mes joies et mes colères, mes rires et mes pleurs.

Ensuite je tiens très chaleureusement à montrer ma gratitude à l'ensemble de mes directeurs de thèse. Merci à toi Laurent d'avoir toujours été là, de mon stage à mon passage en Cifre jusqu'à ma soutenance. Surtout, un grand merci de m'avoir permis de continuer cette thèse, d'avoir su monopoliser tant d'énergie pour me donner les moyens de continuer cette belle aventure. Merci beaucoup, surtout que je réalise durant combien de pauses-café j'ai pu t'embêter. J'espère pouvoir bientôt partager quelques bières au Hellfest ! Merci à Pierre, pour m'avoir porté et soutenu dans cette grande aventure scientifique sur l'exergie radiative. Bravo pour ta patience, ton enseignement, ta rigueur et parfois ton indulgence. Je ne serais pas arrivé là sans toi ; j'ai beaucoup appris de nos échanges. Enfin, mes remerciements les plus sincères à Audrey. Merci de m'avoir fait confiance, d'avoir partagé quelques lignes de code sur lesquelles j'ai pu bâtir ce travail. Merci de m'avoir poussé à mon maximum, de m'avoir enseigné la précision et la concision et de m'avoir accompagné durant tous les processus de rédactions.

Merci à mes parents, pour m'avoir encouragé lors de mes longues études et de m'avoir donné toutes les clefs pour réaliser aujourd'hui ce long travail. Merci d'avoir cru en moi, même lorsque certains cherchaient à vous persuader du contraire.

Je tiens également à présenter ma reconnaissance à l'ensemble de mes enseignants que j'ai pu croiser au cours de ma scolarité, du primaire aux bancs de l'université. Merci à vous d'avoir partagé votre savoir avec moi, et me donner envie à mon tour de faire de même. Merci de m'avoir enseigné confiance en soi, rigueur et discipline et surtout que les deux plus beaux mots en science sont sans aucun doute « Pourquoi ? » et « Tiens, c'est marrant ça... ». J'ai pu ainsi apporter ma modeste pierre à ce bel édifice qu'est le monde de la physique et des sciences de l'ingénieur. Merci aux stagiaires que j'ai pu encadrer lors de cette thèse, j'espère que vous avez autant appris de moi que j'ai appris auprès de vous. Pour finir, cette page ne serait pas complète sans remercier l'ensemble du personnel du laboratoire qui fut un peu mien pendant trois longues, mais belles années. J'espère que mes expériences culinaires vous manqueront. Un grand merci à ma camarade de promotion, Laurie, qui m'a suivi jusqu'au laboratoire et qui fut pour un temps mon coach de rédaction. Une grande pensée à Béatrice qui fut toujours présente et bienveillante dans les moments difficiles. Bon courage à Nicolas pour la suite. Merci aux membres du CESP, Éléonore, Jean-Baptiste et Gabi qui m'ont permis d'avoir de la compagnie lors du début de ma thèse Cifre. Enfin, un grand au revoir aux deux Remy, Paul et Aurélie, Reine, Sébastien, Élie, Antoine, Romain, Natalia et mes infortunés camarades de bureau Dorian et Jean-Marc. Un gros bisou à Sophie, Sylvie, Samia et Sandrine.

Sommaire général

Index des figures	11
Index des tables	17
Index des symboles	20
 Introduction générale	 23
 Chapitre I. Contexte, principes théoriques généraux et état de l'art	 27
I. Introduction du chapitre I.....	29
II. Energie solaire : bref historique et contexte actuel	29
III. Collecteurs solaires à concentration pour un usage thermodynamique	32
3.1. Collecteurs à concentration linéaire	32
3.2. Collecteurs à concentration ponctuelle.....	37
3.3. Synthèse.....	40
IV. Rôle des collecteurs sur les coûts et performances des centrales solaires	42
4.1. Part des surfaces collectrices sur le coût d'investissement des centrales solaires à concentration	42
4.2. Impact des surfaces collectrices sur les performances des centrales solaires.....	44
4.3. Caractéristiques des collecteurs commerciaux de l'industrie CSP.....	46
4.4. Conclusions	49
V. Eléments d'optique de base	49
5.1. Performances optiques spectrales des surfaces	49
5.2. Rendements solaire et thermique des surfaces	50
5.3. Propriétés optiques spectrales des matériaux	55
5.4. Modèles d'approximation du milieu effectif (EMA)	58
VI. Conclusion du chapitre I	59
 Chapitre II. Outils de modélisation et de calcul numérique	 63
I. Introduction du chapitre II.....	65
II. Outils de modélisation de spectres solaires.....	65
2.1. Théorie des modèles atmosphériques	66

2.2.	Logiciel de simulation de spectres solaires : SMARTS-2	70
2.3.	Bilan sur le filtre atmosphérique	71
III.	Simulation et optimisation numériques de couches minces	71
3.1.	Modélisation des propriétés optiques d'empilements de couches minces	72
3.2.	Optimisation des performances optiques d'empilements de couches minces	75
3.2.1.	Principe de l'algorithme d'optimisation	77
3.2.2.	Paramétrage et initialisation de l'algorithme d'optimisation	80
3.3.	Code d'Optimisation des Performances Solaires (COPS)	81
3.3.1.	Paramètres et fonctions principaux	81
3.3.2.	Fonctions secondaires : études sur la rugosité et l'épaisseur des couches	83
IV.	Conclusion du chapitre II	85
Chapitre III. Modélisation de spectres solaires locaux		87
I.	Introduction du chapitre III	89
II.	Analyse de sensibilité	89
2.1.	Paramètres les plus influents	89
2.2.	Paramètres moins sensibles	93
2.3.	Conclusion sur l'étude paramétrique	96
III.	Modélisation de spectres solaires locaux	96
3.1.	Spectre solaire de référence ASTM G173-03 et US Standard Atmosphere (USSA) de 1976	97
3.2.	Spectres solaires locaux moyens en atmosphère réelle	98
3.3.	Suivi annuel de l'irradiance spectrale en atmosphère réelle	102
3.4.	Conclusion sur les spectres solaires modélisés	106
IV.	Conclusion du chapitre III	106
Chapitre IV. Fonction réflexion : couches minces réfléchissantes		109
I.	Introduction du chapitre IV	111
II.	Rappels sur la réflexion et les miroirs solaires	111
2.1.	Type de réflexion : spéculaire / diffuse	111
2.2.	Architecture des miroirs solaires	114
III.	Modélisation de couches réflectrices	115
3.1.	Couches réflectrices métalliques	116

3.2. Couches réflectrices diélectriques multicouches périodiques (réflecteurs de Bragg)	122
3.3. Couches réflectrices diélectriques multicouches non périodiques	125
3.4. Conclusions sur les couches réflectrices solaires	129
IV. Effets additionnels : vers les miroirs et collecteurs solaires réels	130
4.1. Effet de l'ajout de la couche superficielle de protection pour la couche réflectrice	130
4.2. Effet de la rugosité de surface et de l'incertitude d'épaisseur des couches déposées	134
4.3. Modélisation de miroirs solaires complets	139
4.4. Effet des réflexions multiples dans les collecteurs solaires	141
V. Réflexion de spectres solaires locaux	142
5.1. Spectres solaires locaux moyens	143
5.2. Spectres locaux avec suivi annuel de l'irradiance spectrale	144
VI. Conclusion du chapitre IV	147

Chapitre V. Fonction transmittance : verres et antireflets 151

I. Introduction du chapitre V	153
II. Transmittance solaire	153
2.1. Problématique générale	154
2.2. Définitions et sources	156
III. Antireflets solaires monocouches	157
3.1. Eléments de théorie pour les antireflets monocouches	158
3.2. Matériaux pour les antireflets monocouches	160
3.3. Transmittance solaire des antireflets monocouches	162
3.4. Conclusion sur les antireflets solaires monocouches	165
IV. Antireflets solaires bicouches	165
4.1. Eléments de théorie pour les antireflets bicouches	165
4.2. Transmittance solaire des antireflets bicouches	166
4.3. Matériaux pour les antireflets bicouches	167
4.4. Conclusion sur les antireflets solaires bicouches	169
V. Antireflets solaires multicouches	169
5.1. Antireflets multicouches constitués de matériaux poreux	169
5.2. Antireflets multicouches constitués de matériaux denses	171

5.3. Conclusion sur les antireflets multicouches	173
VI. Effets additionnels : vers les vitres antireflet et collecteurs solaires réels	173
6.1. Effet de l'ajout d'une couche de protection pour la couche poreuse.....	174
6.2. Effets de la rugosité de surface et de l'incertitude d'épaisseur des couches déposées.....	175
6.3. Effet de l'angle d'incidence du flux solaire.....	178
6.4. Impact de la qualité du verre utilisé comme substrat	180
6.5. Effet de la réflexion préalable dans les collecteurs solaires	182
VII. Transmission de spectres solaires locaux.....	184
VIII. Conclusion du chapitre V	186

Chapitre VI. Fonction absorptance : absorbeurs à sélectivité spectrale..... 189

I. Introduction du chapitre VI.....	191
II. Absorptance solaire, sélectivité et rendement héliothermique	191
2.1. Problématique générale	191
2.2. Solutions spectralement sélectives et méthode d'optimisation	194
2.3. Rôles respectifs des couches minces dans un empilement sélectif	197
2.4. Rôles du taux de concentration et de la température	199
III. Optimisation de revêtements sélectifs.....	204
3.1. Sélection de matériaux pour revêtements sélectifs.....	204
3.2. Sélection d'antireflets pour revêtements sélectifs	206
3.3. Sélection des structures de revêtements sélectifs	208
3.4. Conclusions sur la sélection des matériaux et structures de revêtements sélectifs .	215
IV. Effets additionnels : vers les absorbeurs et collecteurs solaires réels	216
4.1. Effets de la rugosité et de l'incertitude sur l'épaisseur et la composition des matériaux déposés.....	216
4.2. Effet de l'angle d'incidence du flux solaire.....	220
4.3. Effet des surfaces collectrices en amont du revêtement sélectif	222
4.4. Effet de la géométrie de l'absorbeur thermique	223
V. Absorption de spectres solaires locaux	225
5.1. Spectres solaires locaux moyens	225
5.2. Spectres locaux avec suivi annuel de l'irradiance spectrale.....	228
VI. Conclusion du chapitre VI.....	231

Chapitre VII. Exergie du rayonnement : usage en énergie solaire.....	233
I. Introduction du chapitre VII.....	235
1.1. La notion d'exergie.....	235
1.2. Intérêt de l'analyse exergétique.....	235
1.3. L'exergie radiative.....	238
II. Grandeurs thermodynamiques liées aux flux radiatifs.....	239
2.1. Définition des corps.....	239
2.2. Grandeurs radiométriques.....	240
III. Analyse thermodynamique des convertisseurs solaires	241
3.1. Description du système.....	241
3.2. Densités de flux radiatif.....	243
3.3. Bilan d'énergie, d'entropie et d'exergie	244
3.4. Rendement solaire des convertisseurs radiatifs	245
IV. Performances maximales des convertisseurs solaires	248
4.1. Corps noir	248
4.2. Rendements maximaux sous spectre solaire réel	251
V. Conclusion du chapitre VII	256
 Conclusion générale	 259
 Bibliographie	 267
 Annexes	 281
Annexes du chapitre I.....	283
1.1. Définition des termes optiques	283
1.2. Polarisation	283
1.3. Fonction diélectrique et conductivité	284
Annexes du chapitre II	285
2.1. Paramétrage du pas d'intégration numérique	285

Annexes du chapitre III	287
3.1. Paramètres de modélisation du spectre solaire ASTM G173-03.....	287
3.2. Degré de pollution	287
3.3. Paramètres de modélisation des spectres solaires locaux moyens en atmosphères réelles	288
3.4. Irradiance spectrale temporelle.....	289
Annexes du chapitre IV	290
4.1. Couches réflectrices métalliques	290
4.2. Multicouches réflectrices périodiques mixtes diélectrique/métal	294
Annexes du chapitre V	295
5.1. Solutions théoriques d'antireflets bicouches	295
5.2. Phénomène de réflexion totale	296
Annexes du chapitre VI.....	297
6.1. Références bibliographiques des indices de réfraction complexes	297
6.2. Empilements spectralement sélectifs étudiés	298
6.3. Effet de l'incertitude sur l'épaisseur des couches déposées	300

Index des figures

Figure 1 : Evolution des températures en surface observée entre 1901 et 2012 [8]	30
Figure 2 : A gauche, potentiel des ressources énergétiques mondiales [12]; à droite, carte de la ressource solaire (ensoleillement direct) [13]	31
Figure 3 : Installation, construction et projets de centrales solaires thermodynamiques à travers le monde en 2016 [22].....	32
Figure 4 : Collecteur solaire cylindro-parabolique, Nevada Solar One (USA)	33
Figure 5 : Collecteur solaire PV/CSP, schéma de principe [24]	34
Figure 6 : Collecteur solaire à Réflecteur Linéaire de Fresnel [25], USA, Areva Solar	34
Figure 8 : Collecteur solaire cylindro-parabolique sous serre à Oman [33]	36
Figure 9 : Prototype du collecteur solaire Heliovis [®] , Autriche [31]	36
Figure 10 : Image d'un collecteur linéaire de Fresnel, USA.....	37
Figure 11 : Collecteur solaire parabolique 3D avec moteur Stirling basé à Almeria [23]	38
Figure 12 : Centrale solaire à tour PS10, Espagne PS10, Espagne [23]	38
Figure 13 : Collecteur solaire à tour de type « Beam-Down » installé à Masdar (EAU)	39
Figure 14 : A gauche, vision d'artiste d'un projet de collecteur photovoltaïque 3D. A droite, schéma de principe d'un collecteur Cassegrain thermique.	39
Figure 15 : Diagramme de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration.....	43
Figure 16 : Répartition schématique du prix d'investissement d'une centrale solaire [55]	43
Figure 17 : A gauche, répartition du prix du champ solaire pour une centrale cylindro-parabolique. A droite, prix pour une centrale de 50MW _e avec 7,5h de stockage [55]	44
Figure 18 : Diagramme de répartitions des pertes dans les centrales CSP [47], [54]	45
Figure 19 : Schéma d'un absorbeur solaire sous vide.....	48
Figure 20 : Exemple de calcul d'un rendement solaire	51
Figure 22 : Schéma du taux de concentration par un système de concentration non imageant [70]	55
Figure 23 : Passage d'un cas réel d'inclusions dans une matrice (à gauche) à un milieu effectif homogène théorique (à droite)	58
Figure 24 : Images satellites de la composition atmosphérique mondiale [78]	66
Figure 25 : Schéma du facteur AM et équation le liant à l'angle au zénith solaire θ_s	67
Figure 26 : Spectre en transmission illustrant l'absorption (transmission inférieure à 100%) par les cinq principaux gaz présents dans l'atmosphère terrestre [83].....	69
Figure 27 : Transmittance d'un spectre solaire AM0 à un spectre ASTM G173-03 DC.....	71
Figure 28 : Système multicouche sur un substrat.....	72
Figure 29 : Illustration de trois itérations lors de l'optimisation d'un problème à deux variables avec 50 individus ajoutés par génération et sélection des 15 meilleurs de la population totale à chaque itération.....	79
Figure 30 : Schéma de la méthode de calcul de l'incertitude sur les épaisseurs d'un empilement de deux couches minces, pour l'étude de l'impact sur les performances optiques	84
Figure 31 : Principe de la modélisation par EMA de la rugosité entre deux couches minces .	85
Figure 32 : Impact de la turbidité (AOD à 500 nm) sur l'irradiance spectrale (gauche) et sur l'irradiance (droite)	90

Figure 33 : Influence du facteur Air Mass (AM) sur l'irradiance spectrale (gauche) et l'irradiance (droite)	91
Figure 34 : Effet de la hauteur de colonne d'eau sur l'irradiance solaire	92
Figure 35 : Irradiance en fonction des concentrations de CO ₂ et de O ₃ dans l'atmosphère (en rouge, la valeur de référence ASTM G173-03).....	94
Figure 36 : Schéma du rayonnement circumsolaire et photographie du circumsolaire selon deux conditions météorologiques (journée ensoleillée et partiellement nuageuse)	95
Figure 37 : Part de rayonnement circumsolaire en fonction de l'angle d'acceptance pour 3 valeurs d'AOD à 500 nm	96
Figure 38 : Spectres solaires de référence ASTM G173-03 Global Tilt et Direct + Circumsolaire modélisés sous SMARTS-2 à partir du spectre solaire extraterrestre	98
Figure 39 : Répartition géographique et ressource solaire des 6 sites sélectionnés [105]	99
Figure 40 : AOD moyen mensuel des six sites choisis [105].....	100
Figure 41 : Irradiance spectrale des spectres solaires locaux	102
Figure 42 : Exemple du suivi de l'irradiance DC pour 7 jours à Dakar, Sénégal [94]	103
Figure 44 : Spectres solaires DC représentatifs des conditions annuelles pour les 8 sites [94]	105
Figure 45 : A gauche une surface idéale avec une réflexion dite spéculaire, au milieu et à droite une surface réelle avec une réflexion diffuse (homogène ou inhomogène)	112
Figure 47 : Part de la réflexion spéculaire dans la réflectance solaire en fonction de l'angle d'incidence de la lumière et de la rugosité de surface.....	113
Figure 48: Principales architectures des miroirs solaires [121]	114
Figure 49 : Réflectivité spectrale de dix métaux.....	116
Figure 50 : Réflectance spectrale de l'argent calculée à partir de divers jeux d'indices de réfraction complexes trouvés dans la bibliographie	117
Figure 51 : Réflectance et transmittance solaires d'une couche d'Ag (calculée à partir des indices de Rakic [123]) en fonction de son épaisseur pour différents substrats	118
Figure 52 : Réflectance spectrale de l'aluminium calculée à partir de divers jeux d'indices de réfraction complexes trouvés dans la bibliographie	119
Figure 53 : Réflectance et transmittance solaires de monocouches d'Al (calculée à partir des indices de Rakic [123]) en fonction de l'épaisseur de la couche et de la nature du substrat .	120
Figure 54 : Schéma de l'empilement.....	121
Figure 55 : Réflectance spectrale d'un miroir multicouches métallique Al/Ag, comparée à celle des monocouches prises séparément	122
Figure 56 : Architecture d'un réflecteur de Bragg réparti (DBR).....	123
Figure 57 : Réflectance d'un DBR GaAs/MgF ₂ pour Nb = 10 déposé sur verre BK7®	124
Figure 58 : Etendue de la zone de réflexion d'un miroir de Bragg ($\Delta\lambda$) autour de 600 nm en fonction des indices de réfraction n ₁ et n ₂ des deux matériaux utilisés, selon l'équation IV-3	125
Figure 59 : A gauche, propriétés optiques modélisées du film miroir 3M® PV/CSP [24] ; à droite, réflectance spectrale du film 3M® CMF 330 à incidence 8° et 60° (graphique issu de la brochure commerciale [134])	126
Figure 60 : Empilements de MgF ₂ /TiO ₂ sur de l'argent ou de l'aluminium permettant d'augmenter la réflectance solaire par rapport au substrat seul	127

Figure 61 : Réflectance de l'empilement $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ optimal déposé sur argent, comparée à celle de l'argent seul.....	128
Figure 62 : A gauche, réflectance solaire d'un empilement $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ de bicouches diélectriques sur substrat de fer, en fonction du nombre total de couches. A droite, réflectance spectrale observée pour 50 couches $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ optimisées.	129
Figure 63 : Architecture de miroirs comprenant une couche protectrice	131
Figure 64 : A gauche, réflectance d'une couche réflectrice argent avec une couche de protection de 1 mm en verre BK7® ; à droite, réflectance solaire du système en fonction de l'épaisseur de verre protecteur	132
Figure 65 : Réflectance solaire d'une couche réflectrice argent protégée par différents verres, en fonction de l'épaisseur de verre.....	132
Figure 66 : Réflectance solaire d'un miroir argent recouvert d'une couche protectrice d'oxyde, pour différents oxydes, en fonction de l'épaisseur d'oxyde.....	133
Figure 67 : Réflectance solaire d'un miroir argent avec couche protectrice de polycarbonate, en fonction de l'épaisseur de la couche protectrice	134
Figure 68 : Types de rugosité d'un empilement réfléchissant	135
Figure 69 : Effet des rugosités aux interfaces sur la réflectance solaire de l'empilement substrat / Ag (150 nm) / rugosité n°2 / verre protecteur BK7® (1 mm) / rugosité n°1 / air.....	136
Figure 70 : Réflectance solaire moyenne d'un empilement 4 bicouches $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ sur argent en fonction des incertitudes de dépôt	138
Figure 71 : Miroirs solaires complets modélisés.....	139
Figure 72 : Réflectance solaire d'un ou de plusieurs miroirs métalliques	141
Figure 73 : Part de la réflexion solaire spéculaire par rapport à la réflexion totale en fonction de la rugosité	147
Figure 74 : Réflexion aux deux interfaces d'un verre et transmittance deux faces pour la structure CAR/verre/CAR	156
Figure 75 : Architecture (une face) d'une CAR monocouche sur un verre	158
Figure 76 : Réflectivité (ρ) par face pour un verre ($n = 1,5$; $k = 0$) avec des couches antireflets d'indices différents.....	159
Figure 77 : Réflectivité spectrale par face pour deux verres d'indice de réfraction différents, avec et sans CAR.....	160
Figure 78 : Dépôt d'une CAR SiO_2 poreux par dip-coating [162]	161
Figure 79 : Dépôt de nanoparticules de SiO_2 sur verre créant une CAR poreuse [163]	161
Figure 80 : Photographie MEB des yeux d'un moustique [169].....	162
Figure 81 : Antireflet autonettoyant recréé par lithographie [171]	162
Figure 82 : Réflectance spectrale par face de monocouches antireflet optimisées MgF_2 dense et SiO_2 poreux (Table 19) sur verre BK7® de 1 mm d'épaisseur.....	164
Figure 83 : Architecture d'une bicouche antireflet (une face)	165
Figure 84 : Transmittance solaire une face en fonction des indices n_1 et n_2 d'un bicouche antireflet d'épaisseurs optimisées sur substrat d'indice $n_s = 1,51$	167
Figure 85 : Transmittance solaire une face d'un bicouche de SiO_2 poreux déposé sur 1 mm de verre BK7®	168
Figure 87 : Architecture et transmittance solaire deux faces (T_{s-2}) des couches antireflets à base de SiO_2 poreux sur 1 mm de BK7® d'épaisseurs et porosités (VF) optimisées	170

Figure 88 : Réflectance d'un CAR tricouche uniquement constitué de matériaux denses	173
Figure 89 : Modification de la surface d'une couche de SiO ₂ poreux par remplacement des groupements hydroxyles [161]	174
Figure 90 : Empilement de CAR SiO ₂ poreux avec une couche de protection en SiO ₂ dense sur un substrat de 1 mm de BK7®	174
Figure 91 : Architecture d'un antireflet monocouche avec deux interfaces rugueuses	176
Figure 92 : Influence de la rugosité sur la réflectance solaire d'une CAR de SiO ₂ poreux (125 nm, porosité 50%) sur 1 mm de verre BK7®	177
Figure 93 : Variation de transmittance solaire par face due aux incertitudes sur l'épaisseur et la porosité d'une couche antireflet SiO ₂ (124,8 nm, porosité 50%) sur 1 mm de verre BK7® ..	178
Figure 94 : Transmittance solaire deux faces en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement sur une monocouche de SiO ₂ poreux sur verre BK7®	179
Figure 95 : Epaisseur et porosité optimisées en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement pour une couche antireflet de SiO ₂ déposée sur verre BK7®	179
Figure 96 : Réflectance par face d'un antireflet SiO ₂ poreux sur verre BK7® optimisé pour différents angles d'incidence.....	180
Figure 97 : Transmittance solaire deux faces en fonction du type de substrat pour une monocouche de SiO ₂ poreux.....	181
Figure 98 : Transmittance solaire deux faces d'un verre avec antireflet monocouche SiO ₂ poreux en fonction du spectre solaire de référence (barres bleues) ou du spectre solaire réfléchi par différents miroirs (barres rouges).....	183
Figure 99 : Monocouche antireflet à base de SiO ₂ poreux sur 1 mm de BK7® optimisée en fonction des spectres solaires de référence et locaux	186
Figure 100 : Rendement de conversion de l'énergie solaire en travail en fonction de la température de l'absorbeur, pour plusieurs taux de concentration (de 10 à 5000), dans le cas d'un absorbeur corps noir (traits pleins) et d'un absorbeur sélectif idéal (pointillés).....	193
Figure 101 : Principaux types d'absorbeurs sélectifs [189]	195
Figure 102 : Génération aléatoire d'empilements constitués de matériaux théoriques.....	197
Figure 103 : Structures d'empilements et types de matériaux assurant un rendement héliothermique élevé	197
Figure 104 : Réflectance spectrale couche par couche d'un empilement sélectif W/SiCH/W/SiCH développé à PROMES [89] comparée au spectre solaire et au spectre du corps noir à 500°C (pondéré)	198
Figure 105 : Exemple d'empilement spectralement sélectif W/W-Al ₂ O ₃ /SiO ₂	199
Figure 106 : Rendement héliothermique d'un empilement sélectif W/W-Al ₂ O ₃ /SiO ₂ optimisé, en fonction du taux de concentration et de la température de l'absorbeur.....	199
Figure 107 : À gauche, absorptance solaire d'un empilement spectralement sélectif optimisé W/W-Al ₂ O ₃ /SiO ₂ , à droite, émittance corps noir, en fonction du taux de concentration et de la température de l'absorbeur.....	200
Figure 109 : Epaisseurs optimisées de la couche antireflet de SiO ₂ (gauche) et de la couche métallique de W (droite), en fonction du taux de concentration et de la température	202
Figure 111 : Revêtements sélectifs à gradient de cermet W-Al ₂ O ₃ sur W avec CAR Al ₂ O ₃	209
Figure 112 : Empilement sélectif utilisant une alternance de bicouches W/Al ₂ O ₃	210

Figure 113 : Réflectance spectrale en fonction du nombre de bicouches W/Al ₂ O ₃ pour C = 80 et T = 823 K	211
Figure 114 : Empilements sélectifs utilisant des alternances de bicouches W-Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ . 212	
Figure 115 : Empilements spectralement sélectifs utilisant des alternances W/W-Al ₂ O ₃ avec couche antireflet Al ₂ O ₃	213
Figure 117 : Rugosités observables dans différents empilements spectralement sélectifs	217
Figure 118 : Convergence de l'optimisation des variables d'un empilement spectralement sélectif multicouche métal/diélectrique W/Al ₂ O ₃	219
Figure 119 : Convergence d'optimisation des variables d'un empilement spectralement sélectif de type double cermet W/Al ₂ O ₃	219
Figure 120 : Trois types d'empilements spectralement sélectifs, classés en fonction de leur rendement héliothermique à C = 80, T = 823 K	220
Figure 122 : Rendements héliothermiques en fonction de l'angle d'incidence	221
Figure 123 : Réflectance d'un double cermet pour différents angles d'incidence (°).....	221
Figure 124 : Réflectance d'un empilement spectralement sélectif avec et sans modification du spectre solaire par un miroir 3M [®] PV/CSP, pour C = 80, T = 823 K	223
Figure 126 : Rendement héliothermique d'un revêtement sélectif W/W-Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ pour une température de 573 K en fonction du rapport concentration/facteur géométrique	225
Figure 127 : Rendement héliothermique selon le spectre solaire ASTM G173-03 DC ou selon un spectre solaire local pour C = 80 et T = 823 K, avec optimisation du revêtement sélectif pour le spectre de référence ASTM (bleu) ou pour le spectre local (rouge)	226
Figure 128 : Empilements spectralement sélectifs à bicouches métal/cermet	228
Figure 129 : Réflectance spectrale de deux empilements sélectifs (un ou trois bicouches métal/cermet W/W-Al ₂ O ₃ avec antireflet Al ₂ O ₃) pour deux couples concentration/température de 120/573 K et 10/823 K	229
Figure 130 : Flux, destruction et accumulation d'exergie à l'échelle de la planète [205]	236
Figure 131 : Procédés de conversion entre deux sources de température [206]	237
Figure 132 : Bilan thermodynamique d'une surface à température constante	242
Figure 133 : Rendement solaire des convertisseurs thermodynamiques réversibles en fonction de la température de l'absorbeur. Tous les émetteurs sont considérés comme des corps noirs à T _s = 5800 K (soleil), T ₀ = 300 K (environnement) et T _a (absorbeur).	250
Figure 134 : Rendement solaire maximal d'un convertisseur PVT, pour une surface irradiée noire, grise (α = 0,9), ou sélective à T ₀ = 288,1 K sous spectre solaire ASTM G173-03 DC avec un taux de concentration de 10.....	252
Figure 136 : Facteur de qualité spectrale selon le spectre ASTM G173-03 DC	254
Figure 137 : Transmittance de l'atmosphère correspondant au passage du spectre solaire ASTM G173-03 Etr à DC	255
Figure 138 : Rendement solaire maximal d'un convertisseur thermomécanique, pour une surface irradiée noire, grise (α = 0,9) ou sélective, à T ₀ = 288,1 K sous spectre solaire ASTM G173-3 DC avec un taux de concentration de 10.....	256
Figure 139 : Onde lumineuse avec un champ magnétique B et un champ électrique E à angle droit l'un de l'autre [223], [224]	284
Figure 140 : Spectre solaire en fonction de l'heure locale pour Kramer Junction.....	290

Figure 141 : Transmittance spectrale de couches minces d'argent et d'aluminium de différentes épaisseurs	291
Figure 142 : Principe des multicouches métalliques périodiques, cas d'un bicouche Ag/Al	292
Figure 143 : Réflectance de l'empilement Ag/Al périodique	293
Figure 144 : Réflectance solaire d'un miroir composite argent-aluminium en fonction du taux d'argent, comparée à la réflectance solaire de l'argent et de l'aluminium purs.....	294
Figure 145 : Principe des multicouches métal/diélectrique périodiques, cas d'un bicouche Al/SiO ₂	294
Figure 146 : Réflectance de l'empilement Ag/SiO ₂ périodique.....	295
Figure 147 : A gauche, double cermet/diélectrique sur base W, à droite, double métal/cermet avec couche antireflet Al ₂ O ₃	300
Figure 148 : Convergence des variables d'un empilement spectralement sélectif d'une double alternance cermet/diélectrique W-Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	301
Figure 149 : Convergence de l'optimisation des variables d'un empilement spectralement sélectif à double alternance métal/cermet W/W-Al ₂ O ₃	302

Index des tables

Table 1 : Synthèse du nombre d'interfaces présentes dans les différents types de collecteur solaire à concentration utilisables dans les centrales solaires thermodynamiques.....	40
Table 2 : Caractéristiques des concentrateurs cylindro-paraboliques sur le marché en 2017 [57]	47
Table 3 : Absorbeurs solaires sous vide sur le marché entre 2014 et 2017 [57]	48
Table 4 : Résumé des performances solaires des composants industriels.....	49
Table 5 : Indices optiques idéaux selon la fonction optique recherchée	57
Table 6 : Paramétrage type de l'algorithme d'optimisation	81
Table 7 : Ecart sur l'irradiance selon les différents modèles atmosphériques	93
Table 8 : Irradiance solaire en fonction du degré de pollution.....	93
Table 9 : Synthèse des paramètres d'entrée et de l'irradiance des spectres solaires issus d'atmosphères réelles [105], [13].....	100
Table 10 : Synthèse des spectres solaires DC issus du suivi annuel [94], [13].....	105
Table 11 : Réflectivité solaire ρ_s de dix métaux.....	117
Table 12 : Performances solaires simulées de différents miroirs multicouches métalliques .	121
Table 13 : Réflectance solaire des miroirs solaires modélisés	140
Table 14 : Réflectance solaire totale dans le cas de réflexions simples ou multiples, selon deux méthodes de calcul	142
Table 15 : Réflectance solaire de miroirs optimisés en fonction de spectres solaires locaux moyens	143
Table 16 : Part des densités de flux de 280 à 400 nm par rapport au spectre solaire complet (250 à 2500 nm) pour les 6 sites avec spectres moyens	144
Table 17 : Réflectance solaire annuelle pour les cinq miroirs en fonction du site.....	145
Table 18 : Part des densités de flux de 280 à 400 nm par rapport au spectre solaire complet (250 à 2500 nm) pour les 8 sites avec suivi annuel	145
Table 19 : Transmittance solaire deux faces et absorptance solaire obtenues avec différentes CAR d'épaisseur et de porosité optimisées pour 1 mm de verre BK7®	164
Table 20 : Réflectance solaire de CAR multicouches d'indices de réfraction et d'épaisseurs optimisées pour un substrat d'indice $n_s = 1,51$	171
Table 21 : CAR tricouche uniquement constituée de matériaux denses (composites)	172
Table 22 : Transmittance solaire une face d'une CAR SiO ₂ poreux optimisée avec une couche de protection en SiO ₂ dense	175
Table 23 : Transmittance solaire deux faces d'antireflets en fonction des sites	184
Table 24 : Exemples d'empilements métal/cermet/CAR assurant le meilleur rendement héliothermique en fonction du taux de concentration (C) et de la température (T)	205
Table 25 : Rendement héliothermique d'un empilement W/W-Al ₂ O ₃ avec une à trois couches antireflet (CAR), en fonction de la concentration et de la température	206
Table 26 : Rendement héliothermique d'empilements spectralement sélectifs W/W-Al ₂ O ₃ /CAR avec des antireflets SiO ₂ compact ou poreux	207

Table 27 : Rendement héliothermique des revêtements à gradient de cermet W-Al ₂ O ₃ sur base de W avec couche antireflet Al ₂ O ₃ , en fonction de la température et du taux de concentration	209
Table 28 : Rendement héliothermique d'empilements spectralement sélectifs utilisant une alternance de bicouches W/Al ₂ O ₃ , pour différents couples concentration/température	210
Table 29 : Rendement héliothermique d'empilements spectralement sélectifs utilisant des alternances W-Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	212
Table 30 : Rendement héliothermique d'alternances W/W-Al ₂ O ₃ avec couche antireflet Al ₂ O ₃	213
Table 31 : Absorptance solaire et émittance corps noir d'empilements sélectifs W/W-Al ₂ O ₃	213
Table 32 : Impact des rugosités de 0 à 10 nm sur le rendement héliothermique de différents empilements spectralement sélectifs (C = 80 et T = 823 K)	217
Table 33 : Gain de rendement héliothermique d'une surface W/W-Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ en tenant compte de l'altération du spectre solaire par différentes surfaces	222
Table 34 : Irradiance et DNI annuel des spectres solaires locaux.....	226
Table 35 : Gain de rendement héliothermique de spectres solaires locaux par rapport au spectre ASTM en tenant compte de la différence d'irradiance	227
Table 36 : Absorptance solaire annuelle en fonction du type d'empilement, des conditions opératoires et du site considéré	229
Table 37 : Rendement de conversion maximum d'un rayonnement émis par un corps noir selon les différents auteurs.....	238
Table 38 : Grandeurs radiométriques	240
Table 39 : Densités de flux radiatif interagissant avec l'élément de surface dS (k étant le type d'émetteur)	243
Table 40 : Rendements de conversion réversible et irréversible des systèmes hybride, photovoltaïque et thermique.....	247
Table 41 : Densité de flux net énergétique, transmittance atmosphérique et facteurs de qualité des spectres solaires ASTM G173-03	254
Table 42 : Irradiance énergétique et facteur de qualité des spectres solaires locaux	255
Table 43 : Erreur d'intégration numérique d'une fonction spectrale dans le visible et dans l'IR en fonction des pas de discrétisation utilisés.....	286
Table 44 : Paramètres utilisés pour modéliser les spectres solaires de référence ASTM G173-03	287
Table 45 : Calcul de l'AOD moyen sur l'ensemble des USA [81]	287
Table 46 : Composition en ppmv des différents gaz présents dans l'atmosphère en fonction du degré de pollution préconfiguré dans SMARTS-2 [86]	287
Table 47 : Paramètres des spectres solaires locaux (1)	288
Table 48 : Paramètres des spectres solaires locaux (2)	289
Table 49 : Propriétés optiques solaires de couches minces métalliques de 20 nm d'épaisseur	291
Table 50 : Réflectance et absorptance solaires d'empilements de trois couches minces métalliques	292
Table 51 : Solutions exactes donnant $\rho(\lambda) = 0$ avec un antireflet bicouche	296

Table 52 : Bibliographie pour les indices de réfraction complexes des métaux	297
Table 53 : Bibliographie pour les indices de réfraction complexes des diélectriques	297
Table 54 : Empilements spectralement sélectifs pour $C = 80$ et $T = 823\text{ K}$ (550°C) classés selon leur rendement héliothermique.....	298

Index des symboles

Index des symboles latins

- A : absorptance spectrale d'un échantillon ou d'un matériau, sans unité.
- A_S : absorptance solaire d'un échantillon ou d'un matériau, sans unité.
- A_T : absorbance, soit le flux lumineux traversant l'échantillon.
- B_x, C_x : paramètres de l'équation de Sellmeier ($x = 1, 2, 3$).
- C : facteur de concentration optique, sans unité.
- c : vitesse de la lumière dans le vide égale à 299 792 458 m/s.
- $\vec{D}$: (vecteur) champ d'induction électrique.
- d : épaisseur d'une couche mince en m, très souvent exprimée avec un préfixe du système international des unités (en particulier 10^{-9} , nm). $\vec{E}$: (vecteur) champ électrique.
- $E_{CN}(T)$: Emittance corps noir à la température T , sans unité.
- E_i : amplitude d'une onde lumineuse incidente, sans unité.
- E_r : amplitude d'une onde lumineuse réfléchie, sans unité.
- E_t : amplitude d'une onde lumineuse transmise, sans unité.
- h : angle horaire, en degrés.
- I_0 : rayon ou flux incident.
- J : densité de flux, en W/m^2 .
- J_i : densité de flux incidente sur l'absorbeur thermique, en W/m^2 .
- J_{sol} : radiosité du spectre solaire, en $W.m^{-2}$.
- k : coefficient d'extinction, partie complexe de l'indice de réfraction complexe, sans unité.
- L : épaisseur d'atmosphère traversée, en m.
- L_0 : épaisseur d'atmosphère minimum, en m.
- n : indice de réfraction, partie réelle de l'indice de réfraction complexe, sans unité.
- $N(\lambda)$: indice de réfraction complexe, composé de l'indice de réfraction (n , part réelle) et du coefficient d'extinction (k , part complexe).
- N_p : nombre de périodes dans un empilement bicouche.
- P : porosité d'un matériau, souvent exprimé en pourcentage.
- r : coefficient de réflexion en amplitude.
- R : réflectance d'un échantillon, sans unité.
- r_{opt} : rendement optique d'un collecteur solaire, sans unité.
- R_s : réflectance solaire d'un échantillon, sans unité.
- R_{sp} : réflexion spéculaire, sans unité.
- t : coefficient de transmission en amplitude.
- T : transmittance spectrale d'un échantillon, sans unité.
- T_0 : température de l'environnement ambiant, en Kelvins.
- T_a : température de l'absorbeur, en Kelvins.
- T_e : température, en Kelvins.
- t_{ps} : temps, en secondes (s).

- T_s : transmittance solaire d'un échantillon, pour une face, sans unité.
- T_s 2 faces : transmittance solaire d'un échantillon, pour deux faces, sans unité.
- V : nombre d'Abbe, sans unité.
- V_f : composition (fraction volumique) d'un cermet, sans unité.
- S : surface, en unités d'aire (m^2).
- n : indice de réfraction réel (n) ou un nombre entier naturel (n) dans une équation.
- i : nombre imaginaire, qui au carré vaut -1.

Index des symboles grecs et coptes

- Φ_λ^i : énergie incidente, en W.
- Φ_λ^t : énergie transmise en W.
- T : transmittance spectrale d'un échantillon.
- α : absorptivité spectrale, propriété intrinsèque d'un matériau, pour une longueur donnée.
- $\text{\AA}$: l'exposant de la longueur d'onde pour la turbidité Angström.
- θ : coefficient de turbidité Angströms.
- Δ : différence de phase, sans unité.
- $\Delta\lambda$: écart entre deux longueurs d'onde.
- ε : permittivité d'un milieu, sans unité.
- ε_0 : permittivité diélectrique du vide, $\varepsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} F.m^{-1}$
- ε_{eff} : constante diélectrique (ou permittivité relative) du milieu effectif, dans les EMA.
- ε_i : constante diélectrique des inclusions, dans les EMA.
- ε_M : constante diélectrique de la matrice, dans les EMA.
- ε_r : permittivité relative, sans unité.
- θ : angle d'incidence, en degrés.
- θ_S : angle solaire au zénith, en degrés.
- λ : longueur d'onde, en mètre, très souvent exprimée avec un préfixe du système international des unités.
- π : constante pi ($\approx 3,1415927$).
- ρ : réflectivité, propriété intrinsèque d'un matériau, pour une longueur d'onde donnée.
- c : (sigma lunaire) : conductivité d'un matériau, en S/m.
- σ_B : constante de Stefan-Boltzmann.
- σ : écart type.
- σ_{ra} : rugosité, écart moyen arithmétique par rapport à la ligne de moyenne.
- τ : transmittivité spectrale, propriété intrinsèque d'un matériau pour une longueur d'onde donnée.
- Φ : densité de flux, en W/m^2 .
- v : vitesse de phase d'une onde, en m/s.
- θa : rendement de Carnot.

Index des acronymes

- ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie.
- AERONET : Aerosol Robitic Network.
- AM : traduit de l'anglais « Air Mass », masse d'air.
- AOD : traduit de l'anglais « Aerosol Optical Depth », épaisseur optique d'aérosol.
- ASTM : traduit de l'anglais « American Society for Testing and

- Materials », Société américaine des tests et des matériaux.
- CAR : Couche AntiReflet.
 - CIFRE : Conventions Industrielles de Formation par la Recherche.
 - COP : traduit de l'anglais « Conference of Parties », conférence des parties.
 - CP : Couche de Protection.
 - CSP : traduit de l'anglais « Concentrating Solar Power », centrale solaire à concentration.
 - DC : traduit de l'anglais « Direct and circumsolar », irradiance directe et circumsolaire.
 - DCA : Défense Contre les Aéronefs.
 - DNI : traduit de l'anglais « Direct Normal Irradiance », irradiation normale directe exprimée en densité de flux (W/m^2).
 - EMA : traduis de l'anglais « Effective Medium Approximation », approximation du milieu effectif.
 - ESTELA : European Solar Thermal Electricity Association.
 - GES : Gaz à Effet de Serre.
 - GT : traduit de l'anglais « Global Tilt », irradiance globale sous inclinaison.
 - HCE : Hauteur de Colonne d'Eau, en cm.
 - IEA : traduis de l'anglais « International Energy Agency », Agence Internationale de l'Energie.
 - IR : Infrarouge, de 2,5 à 30 μm .
 - ISO : traduit de l'anglais « International Organization for Standardization », organisation internationale pour la standardisation.
 - LabEx : Laboratoire d'Excellence.
 - LCOE : traduit de l'anglais « Levelized Cost of Electricity », coût normalisé de l'énergie électrique.
 - RLF : Réflecteur Linéaire de Fresnel.
 - NF : Norme Française.
 - NIR : traduit de l'anglais « Near Infrared », proche infrarouge.
 - NREL : National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA.
 - PACVD : Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition.
 - PC : polycarbonate.
 - PME : Petites et Moyennes Entreprises.
 - PMMA : polyméthacrylate.
 - PROMES : laboratoire PROcédés Matériaux Energie Solaire, Unité Propre du CNRS (UPR 8521).
 - PV : Photovoltaïque.
 - PVD : Physical Vapor Deposition.
 - SMARTS : Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine.
 - SSRM : Spectre Solaire de Référence Mondiale, soit l'ASTM G173-03.
 - USSA : US Standard Atmosphere.
 - UTC : traduis de l'anglais « Universal Time Clock » temps universel coordonné.
 - UV : Rayonnement Ultra-Violet, de 280 à 380 nm.

Introduction générale

Notre société et notre mode de vie actuels s'appuient en grande partie sur l'utilisation de ressources énergétiques carbonées d'origine fossile. Compte tenu à la fois de leur raréfaction et des émissions de gaz à effet de serre liées à leur utilisation, nous devons rapidement augmenter le recours à des énergies propres et renouvelables : hydraulique, marémotrice, éolienne, biomasse, géothermique et solaire. En parallèle de la filière solaire photovoltaïque, la filière solaire thermodynamique sous concentration est une voie en plein développement au niveau mondial. Cette filière consiste à collecter et concentrer l'énergie radiative du Soleil pour la transformer en chaleur, à des niveaux de température utilisables dans un cycle thermodynamique, pour la convertir ensuite en électricité. C'est actuellement la seule filière solaire à proposer des stockages à grande échelle économiquement viables offrant la possibilité d'une production électrique continue et décalée. Cette technologie est ainsi complémentaire des autres filières renouvelables et s'inscrit naturellement dans le mix énergétique à venir. Elle devrait représenter 11% de la production électrique mondiale en 2050 selon l'IAE.

Le collecteur solaire est l'élément qui convertit l'énergie solaire radiative en énergie thermique pour chauffer un fluide caloporteur. Les rendements de conversion des collecteurs permettent aujourd'hui d'obtenir des prix concurrentiels de l'électricité produite. Cependant ces derniers doivent encore être abaissés pour favoriser le déploiement de la filière. Le champ solaire, souvent composé d'un grand nombre de collecteurs, reste un investissement important, de l'ordre de 30% du coût total d'une centrale solaire. Les surfaces de collection en jeu sont grandes, environ 10 000 m² de collecteurs par MW électrique. De plus, le champ solaire est le siège de pertes optiques et thermiques élevées qui représentent jusqu'à 50% des pertes totales de la centrale. Ainsi, faire gagner aux collecteurs solaires quelques pourcents de rendement est un enjeu économique réel.

De nombreuses technologies de collecteurs solaires existent aujourd'hui. Chaque collecteur solaire a ses particularités : géométrie (2D ou 3D), taux de concentration du flux solaire, méthode optique assurant la concentration (lentille(s) ou miroir(s)), nombre d'éléments, capteur thermique sous air ou sous vide, température de fonctionnement, etc. Malgré les nombreux concepts de collecteurs solaires inventés jusqu'à aujourd'hui, ces derniers font systématiquement appel à trois fonctions unitaires assurées par des interfaces réfléchissantes, transparentes et absorbantes, que l'on retrouve sous la forme de miroirs, de vitres protectrices et d'absorbeurs thermiques. Le rayonnement solaire rencontrera donc au moins une fois chacun de ces types d'interfaces au cours du processus de captation par le collecteur.

Pour améliorer les rendements de conversion des collecteurs solaires et ainsi diminuer les coûts de l'électricité produite, des revêtements constitués d'une ou plusieurs couches minces sont spécialement développés pour chacune de ces interfaces. Ces couches minces permettent d'améliorer la réflectivité, la transmittivité ou l'absorptivité d'un support. L'ensemble des couches minces utilisées dans les divers éléments du collecteur permet d'assurer une transformation plus efficace du spectre solaire en énergie thermique.

De nombreuses solutions couches minces sont aujourd'hui proposées par les industriels pour la construction des centrales solaires. Il reste pourtant une marge d'amélioration possible des performances grâce au développement de solutions innovantes. De plus, les différentes solutions commerciales sont standardisées, en particulier pour les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques : elles sont toutes étudiées, dimensionnées et caractérisées pour répondre efficacement à un spectre solaire de référence mondiale. En réalité, l'allure du spectre solaire à convertir dépend du lieu envisagé pour installer une centrale solaire thermodynamique. La distribution spectrale est sensible à plusieurs critères : altitude, latitude, composition de l'atmosphère. En lieu et place des stratégies d'optimisation standardisée actuelles, les couches minces utilisées dans les collecteurs solaires peuvent dans le principe être optimisées spécifiquement pour les conditions particulières des sites d'installation envisagés. D'autre part, dans le collecteur, les surfaces reçoivent en cascade un spectre solaire partiellement modifié (réfléchi ou transmis) par la surface précédente, et non le spectre solaire de référence ou local. Là encore, il est en théorie possible d'optimiser les différentes surfaces selon la géométrie du collecteur sélectionné. Le but est dans tous les cas d'augmenter le rendement de conversion du collecteur solaire et ainsi d'abaisser les coûts de production d'électricité solaire à concentration.

Dans ce contexte, mes travaux de thèse sont basés sur la simulation thermo-optique d'exemples illustratifs ou de solutions originales de traitements des surfaces assurant chacune des trois fonctions nécessaires au fonctionnement des collecteurs : réflexion, transmission et absorption. Ils interrogent sur la pertinence de l'optimisation de chacune de ces fonctions élémentaires que l'on retrouve quelles que soient les technologies de collecteurs employées dans les centrales solaires. Ces travaux ont plusieurs objectifs :

- Montrer, sur la base d'exemples concrets ou en voie de développement, que chacune des trois fonctions élémentaires est optimisable par rapport aux solutions existantes. En jouant sur la nature et l'épaisseur des couches minces choisies, il est possible de maximiser la propriété optique solaire d'intérêt (réflectivité, transmittivité ou absorptivité solaires, selon le type d'interface considéré), en prenant néanmoins en compte certains aspects additionnels mais non négligeables, tels que la rugosité des matériaux déposés et les éventuelles incertitudes d'épaisseur et de composition, liées à leur fabrication.
- Etudier l'impact de la distribution spectrale du flux solaire incident sur ces surfaces, en considérant d'une part des sites géographiques représentatifs pour lesquels les conditions atmosphériques sont connues, et d'autre part la modification en cascade du spectre solaire après passage de chaque interface dans le collecteur. La prise en compte des conditions locales et des modifications successives du spectre solaire au sein du collecteur doit donner lieu à des optimisations plus pertinentes pour chaque interface et lieu considérés.
- Afin d'affiner l'analyse, déterminer la part d'énergie du spectre solaire réellement convertible en travail mécanique, par une analyse exergétique des systèmes collecteurs.

Pour cela le manuscrit sera décomposé en sept chapitres.

Le **chapitre I** décrira le contexte général de l'énergie solaire transformée en chaleur par voie thermique et thermodynamique dans le monde, et son historique jusqu'à aujourd'hui. Il

décrira les différentes technologies existantes pour identifier leurs particularités et quelques voies d'améliorations envisageables en termes de surfaces traitées par couches minces pour la conversion thermique de l'énergie solaire. Il introduira également les éléments de théorie nécessaires aux simulations thermo-optiques développées dans ce travail.

Le **chapitre II** sera consacré à la description des outils développés pour modéliser les spectres solaires locaux nécessaires au calcul des performances des interfaces des collecteurs. Dans un second temps, nous présenterons l'algorithme d'optimisation spécialement développé au cours de cette thèse pour l'optimisation des revêtements multicouches assurant les trois fonctions étudiées.

Le **chapitre III** traitera de la modélisation de spectres solaires locaux correspondant à plusieurs lieux d'implantation typiques de centrales solaires à concentration. Nous évaluerons quels sont les paramètres atmosphériques les plus sensibles afin de choisir judicieusement la base de données climatiques nécessaires à la modélisation.

Les **chapitres IV à VI** sont consacrés respectivement aux trois fonctions que l'on retrouve systématiquement dans un collecteur solaire : interfaces réfléchissantes, transparentes et absorbantes. Nous y retrouverons les principes théoriques correspondant à chaque fonction ainsi qu'une analyse bibliographique des solutions existantes et envisagées pour la fonction. Dans chacun de ces chapitres, le but est d'adapter et optimiser des solutions couches minces pour leur fonctionnalité et leur environnement (géométrie de collecteurs solaires, conditions météorologiques) et ainsi proposer des solutions à haute performance par rapport à l'existant. Nous évaluerons également l'effet de certains paramètres additionnels tels que la variabilité des propriétés optiques due à la rugosité de surface, aux incertitudes d'épaisseur et de composition et au vieillissement des couches minces ou l'angle d'incidence du rayonnement.

Enfin, notons que l'ensemble des études développées dans ces chapitres donne uniquement une vision énergétique (quantitative) de la conversion thermique de l'énergie solaire. Le **chapitre VII** aborde donc la question de l'exergie radiative, c'est-à-dire le point de vue qualitatif de l'énergie solaire absorbée et transformée par le collecteur, réellement convertible en travail mécanique (pour être transformée ensuite en énergie électrique). Cette démarche thermodynamique permet d'avoir un cadre rigoureux dans l'analyse de systèmes de conversion en traitant à la fois de la conversion et des irréversibilités. Nous traiterons premièrement de l'approche thermodynamique des différents modes de conversion de l'énergie solaire : thermique (T), photovoltaïque (PV) ou hybride PV-T. Ensuite, nous identifierons l'exergie disponible dans les différents spectres solaires du chapitre III. Le but ultime est de déterminer si l'analyse du rendement du point de vue exergétique peut impacter et améliorer l'optimisation des couches minces.

Ce manuscrit regroupe l'ensemble des travaux de thèse que j'ai pu effectuer durant 18 mois dans le cadre d'une convention CIFRE entre la société Helioprocess et le laboratoire PROMES, puis durant 18 mois à PROMES dans le cadre du Labex SOLSTICE. Il est intitulé :

« Étude, modélisation et optimisation de surfaces fonctionnelles pour les collecteurs solaires thermiques à concentration »

Chapitre I

Contexte, principes théoriques généraux et état de l'art

I. Introduction du chapitre I

Dans ce chapitre, nous allons présenter le contexte général de nos travaux par un bref historique de l'utilisation de l'énergie solaire à travers le monde. Nous décrirons ensuite les différents types de collecteurs solaires (conversion du rayonnement solaire en chaleur) utilisés avec un cycle thermodynamique (conversion de la chaleur en électricité). Cette conversion requiert pour être efficace des températures élevées, qui ne peuvent être atteintes qu'en concentrant la densité de flux émise par le Soleil sur un absorbeur. L'absorbeur convertit alors le flux lumineux en chaleur, transmise à un fluide caloporteur qui permet de la stocker et de la transporter. De façon générale, un collecteur solaire à concentration est constitué de plusieurs éléments, tels que des miroirs, des vitres et un élément absorbeur. Le nombre et le type d'interfaces réfléchissantes, transparentes et absorbantes et le principe de fonctionnement sont propres à chaque type de collecteur. Nous nous intéresserons ensuite au rôle important du champ solaire sur le coût et les limitations de performances des centrales solaires dus à celui-ci. Nous décrirons ensuite les grandes caractéristiques des collecteurs commerciaux utilisés actuellement dans les technologies du solaire concentré. Ce chapitre se conclura par quelques principes théoriques optiques de base nécessaires à l'ensemble des travaux développés dans ce document.

II. Energie solaire : bref historique et contexte actuel

Ce que l'on nomme communément « énergie solaire » est la fraction du rayonnement émis par le Soleil parvenant à la surface de la Terre. Cette énergie provient de la fusion nucléaire qui a lieu au centre de notre étoile. Elle se propage jusqu'à nous sous forme de photons. Avec une réserve de combustible estimée à 5 milliards d'années, elle peut être qualifiée d'inépuisable à l'échelle de l'humanité. Sur Terre, cette énergie est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de l'ensemble de la photosynthèse. Notre existence actuelle est strictement impossible sans elle.

De l'Antiquité à la Seconde Guerre mondiale

Dans le monde antique méditerranéen, Grecs et Romains savaient utiliser l'énergie solaire. Pour allumer la flamme des jeux Olympiques, les Grecs utilisaient un miroir parabolique : le skaphia [1]. Le philosophe Socrate a enseigné l'architecture bioclimatique tandis qu'une légende, bien qu'infondée scientifiquement, décrit Archimède utilisant de grands miroirs pour concentrer les rayons du Soleil lors de la Deuxième Guerre Punique en -212 avant J.-C. [2].

Il fallut attendre le Siècle des Lumières pour voir apparaître les premières tentatives d'applications industrielles. Nous pouvons ainsi noter le concentrateur à lentilles convergentes « à eau » de Lavoisier créé en 1774 pour fondre des métaux sans y incorporer de déchets dus à la combustion [3]. Plus tard, Augustin Mouchot inventa le suivi solaire pour un collecteur

thermique à concentration. Un démonstrateur fut exposé à l'exposition universelle de 1878 pour alimenter une presse d'imprimerie.

Le début du XX^{ème} siècle a connu l'amélioration des procédés utilisant l'énergie solaire, notamment avec l'expérimentation en 1912-1913 de la première centrale solaire cylindro-parabolique de Al Méadi [4], en Égypte par F. Shuman et C.V. Boys [5]. Trois décennies plus tard, en 1946, Félix Trombe eut l'idée d'utiliser un projecteur militaire abandonné comme miroir parabolique orientable [6]. Malgré ces découvertes, la technologie solaire fut malheureusement en partie abandonnée au profit de l'utilisation des énergies fossiles dont notre monde est désormais totalement dépendant.

Monde actuel

Depuis les années 1940, la consommation énergétique mondiale n'a cessé d'augmenter. Elle a été déjà multipliée par quatre depuis le début du XX^{ème} siècle [7]. Pour répondre à ces besoins, la production d'énergie actuelle est majoritairement d'origine fossile (pétrole, charbon et gaz naturel). Cette soif d'énergie carbonée s'accompagne d'un dégagement important de gaz à effet de serre conduisant à une augmentation globale des températures. La température de surface des terres et des océans a ainsi augmenté en moyenne de 0,85°C sur la période 1880-2012 (Figure 1). Elle est susceptible d'augmenter de 1,1 à 6,4 °C au cours du XXI^e siècle selon différentes estimations et scénarii [8].

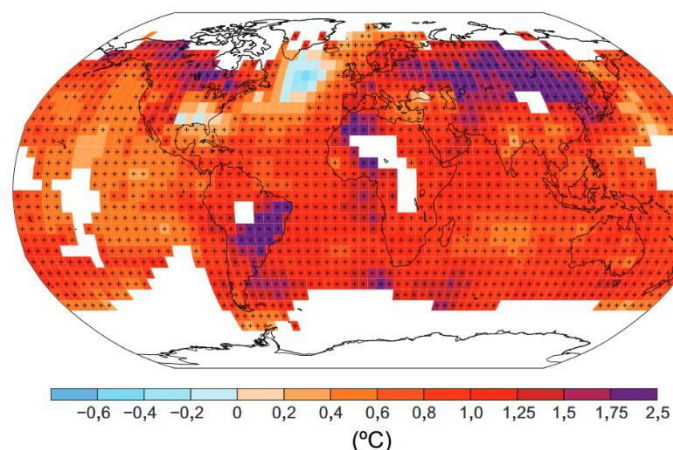


Figure 1 : Evolution des températures en surface observée entre 1901 et 2012 [8]

De ce fait, il est de plus en plus urgent de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) pour freiner le changement climatique. De nombreux accords existent désormais, comme le Protocole de Kyoto [9], les conférences COP [10] ou l'objectif dit des « 3x20 » (20% de réduction des GES, 20% d'économies d'énergie et 20% d'énergie renouvelable) pour l'Europe [11]. Pour atteindre ces objectifs, il est impératif d'augmenter le recours aux énergies renouvelables : solaire, éolien, biomasse, géothermie, etc. Dans ce travail de thèse, nous nous intéresserons à l'énergie solaire.

Valoriser l'énergie solaire

Globalement, la Terre reçoit en 1h30 d'irradiation les besoins énergétiques annuels de l'humanité [7]. Un calcul illustratif bien connu démontre qu'une centrale solaire représentant 0,6% de la taille du Sahara couvrirait les besoins électriques de l'humanité, en tenant compte des rendements de conversion et de l'occupation des sols [11]. D'une manière générale, le potentiel annuel de l'énergie solaire est donc bien supérieur à toutes les autres sources d'énergie, comme l'atteste la Figure 2 (gauche).

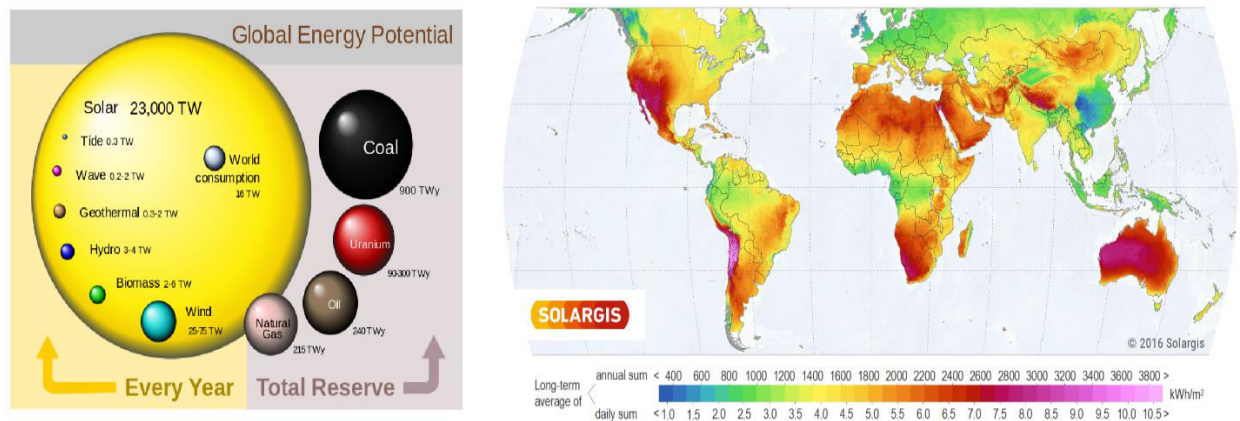


Figure 2 : A gauche, potentiel des ressources énergétiques mondiales [12]; à droite, carte de la ressource solaire (ensoleillement direct) [13]

Si le potentiel de l'énergie solaire est très important, on se heurte néanmoins à plusieurs verrous technologiques et théoriques dans la mise en place de solutions efficaces énergétiquement et économiquement.

- L'énergie solaire est inégalement répartie sur Terre, contre le montre la Figure 2 (droite).
- L'énergie solaire est intermittente du fait des cycles jour/nuit et de l'impact des conditions climatiques locales.

Le monde de demain

Afin d'utiliser le potentiel de l'énergie solaire tout en levant les verrous cités précédemment, deux filières coexistent aujourd'hui. Elles connaissent un fort regain d'intérêt depuis les années 1990-2000 [7]. Avec des coûts de production actuellement en baisse, la filière photovoltaïque permet de convertir directement le flux solaire en électricité [14], [15]. Toutefois, cette filière est limitée par l'inexistence, à grande échelle, de moyens de stockage de l'électricité, pour faire face au problème de l'intermittence solaire [16]. La voie du solaire thermique concentré permet en revanche de résoudre ce problème [17]. En effet dans cette filière, le flux solaire est converti en chaleur facilement stockable, pour pouvoir convertir cette dernière, en dehors des heures d'ensoleillement et à la demande, en électricité à l'aide d'un cycle thermodynamique. Bien qu'affichant actuellement des coûts du kWh électrique supérieurs au photovoltaïque, le service rendu par le solaire à concentration sur la gestion d'un réseau électrique grâce au stockage de chaleur est indispensable, et complémentaire des technologies intermittentes telles que le PV ou l'éolien. Avec la possibilité de produire en continu via des stockages grande capacité [18], [19] à la demande [20], la filière de l'énergie

solaire concentrée thermodynamique est une technologie en déploiement pour la production mondiale [17]. Des études technico-économiques, comme celles de l'IEA [7], de l'ADEME [21] ou d'ESTELA [22] prévoient une forte croissance de la puissance installée (Figure 3).

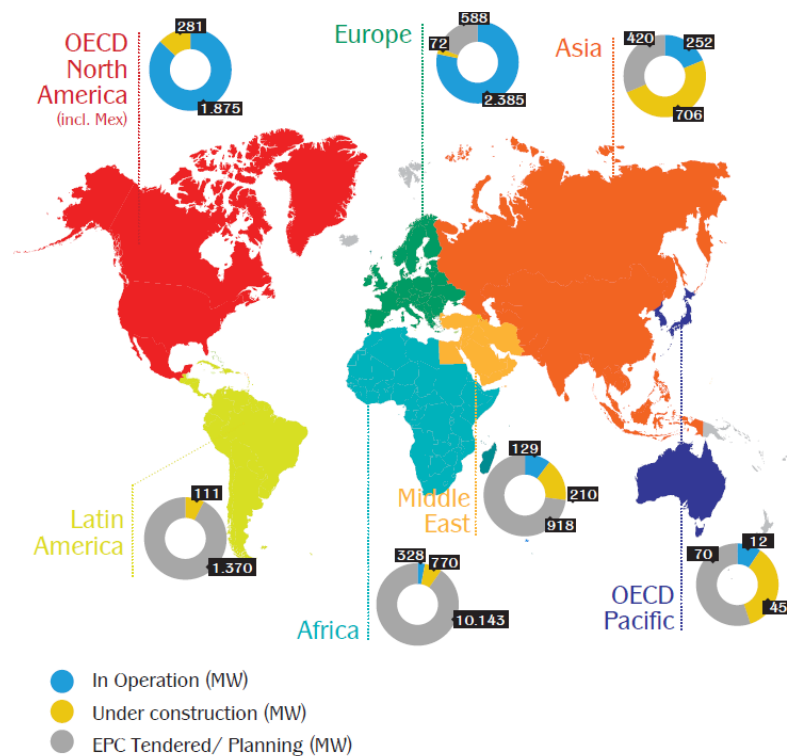


Figure 3 : Installation, construction et projets de centrales solaires thermodynamiques à travers le monde en 2016 [22]

III. Collecteurs solaires à concentration pour un usage thermodynamique

De nombreux types de collecteurs solaires à concentration existent ou sont développées aujourd'hui que ce soit au niveau industriel ou dans les laboratoires (démonstrateurs pilotes). Constitués essentiellement d'un dispositif concentrateur et d'un absorbeur thermique, nous trouvons deux grandes familles de dispositifs : les collecteurs linéaires et les collecteurs à focalisation ponctuelle. Quelques exemples illustratifs sont décrits dans ce qui suit.

3.1. Collecteurs à concentration linéaire

Cylindro-parabolique

La technologie cylindro-parabolique est aujourd'hui la plus déployée dans le monde avec un parc correspondant à environ 4000 MW déployés sur une centaine d'unités assurant 8490 GWh de production en 2014 [23]. Un collecteur cylindro-parabolique utilise une parabole réfléchissante concentrant de l'ordre de 80 à 100 fois la densité du flux solaire sur sa ligne

focale (Figure 4). Le collecteur suit le Soleil sur un seul axe (nord-sud ou est-ouest). Un absorbeur thermique tubulaire est placé sur la ligne focale du miroir. Il assure la conversion de la densité de flux solaire en chaleur vers un fluide caloporteur qui circule à l'intérieur. Les températures de fonctionnement sont de l'ordre de 300 à 550°C. L'absorbeur est composé d'un tube d'acier revêtu par un traitement de surface absorbant le spectre solaire (de 280 à 4000 nm), et faiblement émissif dans le domaine de l'infrarouge (au-delà de 2500 nm) pour limiter les pertes thermiques radiatives. Cet absorbeur thermique est enchâssé sous vide dans un tube transparent, limitant ainsi les pertes thermiques par convection avec l'air environnant. Cette technologie permet aussi de protéger de l'oxydation à chaud les matériaux constituant l'absorbeur, en particulier le revêtement déposé à sa surface. Un collecteur cylindro-parabolique présente donc trois fonctions : une surface réfléchissante (miroir concentrateur), une interface transparente (tube en verre de protection) et une surface absorbante (tube absorbeur).



Figure 4 : Collecteur solaire cylindro-parabolique, Nevada Solar One (USA)

Cylindro-parabolique PV/CSP

Une variante du collecteur précédent est en voie de développement récente. Il couple conversion thermique (CSP) et photovoltaïque (PV). Un collecteur cylindro-parabolique PV/CSP est un collecteur solaire hybride qui convertit la densité de flux solaire du proche infrarouge (Near-IR) en électricité (partie PV), et la part visible et infrarouge (IR) en chaleur (partie CSP), comme illustré par la Figure 5. Cette double fonctionnalité est assurée par un film innovant 3M® [24] qui vient remplacer le miroir solaire. Cette interface est transparente de 700 à 1100 nm pour irradier une cellule PV en silicium placée à l'arrière du film, et réfléchissante sur les autres longueurs d'onde pour irradier un absorbeur thermique conventionnel. Ce collecteur permet d'utiliser le faible coût du PV tout en gardant l'avantage du stockage thermique du CSP [24]. Cela permet de diminuer le prix de l'énergie électrique produite ainsi que le temps de retour sur investissement des centrales PV/CSP de 15 à 20% [24]. Pour sa part thermique, ce type de collecteur très particulier présente dans ce cas une surface réfléchissante sélective en longueur d'onde (miroir concentrateur avec le film 3M®), une interface transparente (tube sous vide) et une interface absorbante (tube absorbeur).

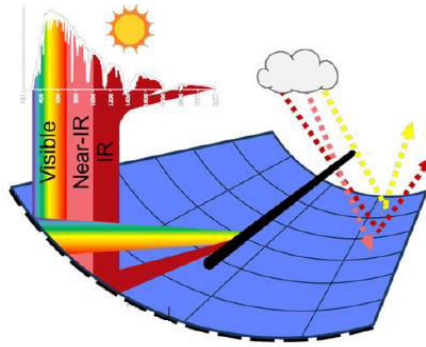


Figure 5 : Collecteur solaire PV/CSP, schéma de principe [24]

Réflecteur Linéaire de Fresnel

Le principe d'un collecteur solaire à Réflecteur Linéaire de Fresnel (RLF ou LFR en anglais) est de reconstituer la courbure de la surface réfléchissante d'un concentrateur cylindro-parabolique par une multitude de facettes quasi planes (entre 18 et 50) orientées différemment. Cela permet de réduire les coûts de fabrication des miroirs qui sont dans ce cas-là quasi plans. Un exemple est présenté sur la Figure 6 [25]. Le suivi du Soleil s'effectue alors en pilotant l'inclinaison individuelle de chaque miroir. Ce type de collecteur est le troisième type le plus déployé au monde avec 17 unités, ce qui correspond à une puissance totale déployée de 500 MW [23]. Chaque miroir étant quasi-plan, la concentration du Soleil est moins précise qu'avec un miroir cylindro-parabolique unique [26]. Par conséquent, la concentration du flux solaire est de l'ordre de 25 à 30 [27]. L'ajout d'un réflecteur secondaire additionnel à l'arrière de l'absorbeur permet d'augmenter le facteur de concentration jusqu'à environ 80-100 [27]. Dans cette technologie, le tube absorbeur est généralement sous air. Une isolation thermique est disposée à l'arrière du miroir secondaire et un verre protège en face avant l'ensemble pour limiter les pertes dues à la convection avec l'air ambiant. Cet ensemble peut éventuellement être placé sous vide. Dans cette configuration, les collecteurs comprennent jusqu'à quatre interfaces : une ou deux interfaces réfléchissantes (concentrateur principal et concentrateur secondaire), une interface transparente (fenêtre de protection) et une interface absorbante (tube absorbeur).

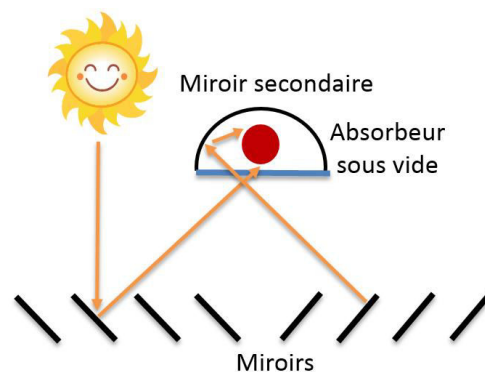
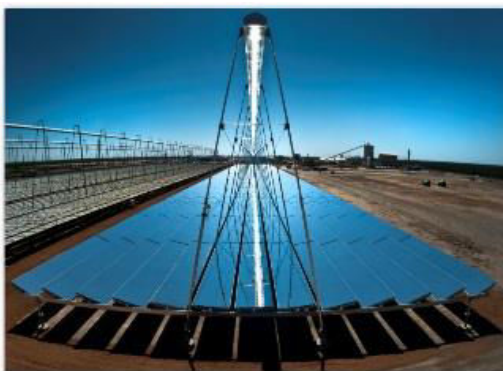
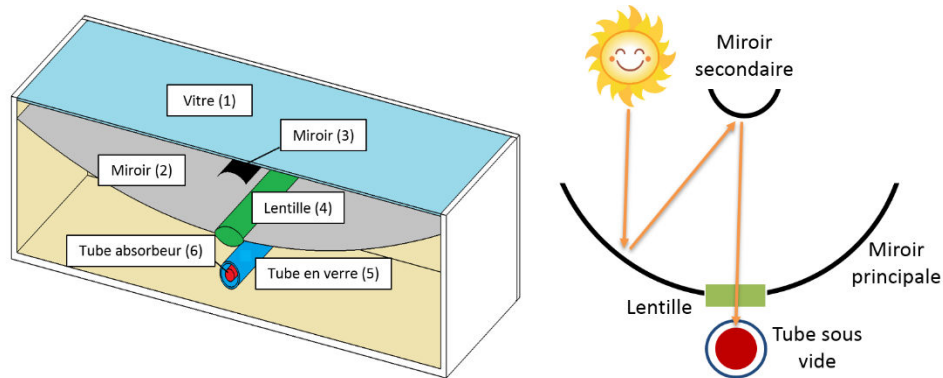


Figure 6 : Collecteur solaire à Réflecteur Linéaire de Fresnel, USA, Areva Solar [25]

Heliotrope®

Nous décrivons ici l'ensemble des deux collecteurs solaires conçus par Helioprocess (dispositif Heliotrope®). Dans ce cas la concentration linéaire est assurée par un premier miroir concave qui réfléchit l'image du Soleil vers un second miroir hyperbolique ou elliptique ; respectivement n°2 et n°3 sur la Figure 7. Pratiquement, en tenant compte de l'ouverture du Soleil à chaque réflexion, le taux de concentration est de l'ordre de 10 à 30 [28]. Les températures visées sont de l'ordre de 100 à 350°C [29]. Le collecteur est fermé par une vitre (élément n°1) pour protéger l'ensemble des surfaces internes (miroirs, lentille, absorbeur thermique). Helioprocess a rajouté une lentille optique (visible en vert, élément n°4 sur la Figure 7) permettant d'augmenter la concentration optique jusqu'à environ 80 à 120. Cette concentration additionnelle dépend de la géométrie de la lentille [29]. Pour le récepteur thermique, le choix de l'entreprise s'est porté vers l'utilisation de tubes absorbeurs sous vide destinés à la géométrie cylindro-parabolique, constitués d'un tube absorbeur (n°6 en rouge) encapsulé dans un tube en verre (n°5 en bleu). Ce type de collecteur dispose donc ici de deux surfaces réfléchissantes, de deux ou trois interfaces transparentes et d'une surface absorbante.



*Figure 7 : A gauche, schéma de principe du prototype Heliotrope® [28].
A droite, vue en coupe schématique du collecteur [29]*

GlassPoint Solar®

L'extraction de pétrole et d'autres énergies fossiles représente un besoin localisé et de courte durée d'une quantité importante de vapeur [30], [31]. La filière CSP se prête remarquablement bien à la production de chaleur, qui peut servir à produire cette vapeur (directement dans le champ solaire ou via un échangeur thermique). L'entreprise GlassPoint Solar [30] a donc placé des collecteurs cylindro-paraboliques dans une serre, comme l'indique la Figure 8. Le but est de protéger les collecteurs de l'environnement extérieur pouvant impacter la productivité ou la durée de vie des collecteurs. Ce système est adapté aux conditions désertiques du Moyen-Orient [32], où les vents de sable peuvent encrasser et détériorer les surfaces optiques. Actuellement la température et le taux de concentration sont ceux d'un collecteur cylindro-parabolique traditionnel [33]. Ce mode d'installation dispose d'une interface réfléchissante (miroir), de deux interfaces transparentes (serre et tube en verre) et d'une interface absorbante (tube absorbeur).

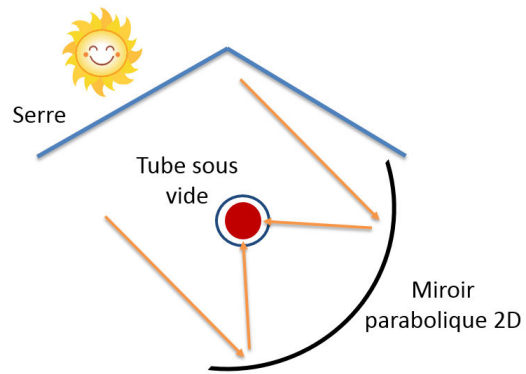


Figure 8 : Collecteur solaire cylindro-parabolique sous serre à Oman [33]

Heliovis®

L'entreprise Heliovis® [31] a créé un collecteur constitué de films plastiques facilement déployables, livré sous forme de rouleaux mis en forme par gonflage [34]. L'imprécision de mise en forme du miroir est compensée par un réflecteur secondaire comme pour les Réflecteurs Linéaires de Fresnel. L'ensemble des surfaces est protégé par un film plastique en fluoropolymère (ETFE) transparent qui sert également à maintenir une légère différence de pression garante de la forme du collecteur [34]. La technologie de l'absorbeur thermique utilisée est identique à celle de nombreux autres collecteurs linéaires : un tube en verre encapsule sous vide un tube absorbeur métallique. Le taux de concentration n'est pas précisé par le constructeur, mais il serait proche de celui des collecteurs cylindro-paraboliques. Le diamètre du miroir est de 8 m, ce qui donnerait une concentration de 88 à 114. Heliovis® utilise des tubes absorbeurs sous vide de diamètres standards (70 ou 90 mm) [31]. Les températures proposées par l'entreprise vont de 80°C à 400°C. Elles sont fonction des besoins (production de froid, de vapeur ou d'électricité). Ce type de collecteur dispose de deux interfaces réfléchissantes (miroirs principaux et secondaires), de deux interfaces transparentes (film plastique, tube en verre) et d'une interface absorbante (tube absorbeur) [34].

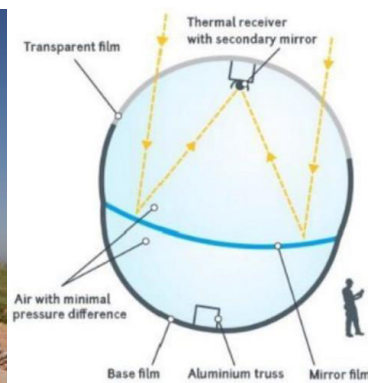


Figure 9 : Prototype du collecteur solaire Heliovis®, Autriche [31]

Lentille Linéaire de Fresnel

Ce type de collecteur solaire, encore en phase de développement [35], [36] utilise une lentille de Fresnel linéaire pour concentrer la densité de flux solaire. Une lentille de Fresnel, ou lentille à échelons, est un dispositif optique assurant la même fonctionnalité qu'une lentille

convergente massive (même distance focale). Mais elle est découpée en sections optimisées pour alléger la masse. Les sections sont concentriques pour une concentration ponctuelle (3D), mais elles peuvent également être parallèles pour une concentration linéaire (2D). Cette géométrie est présentée sur la Figure 10. La lentille 2D peut être mise en forme convexe pour assurer passivement le suivi du soleil, le collecteur complet restant fixe (Figure 10 : photo de gauche) [36]. Les avantages de cette géométrie sont la protection de l'absorbeur thermique vis-à-vis de l'environnement extérieur, le faible coût du dispositif de concentration et le nombre réduit d'interfaces [37], [38]. Comme l'absorbeur thermique peut être placé dans de l'isolant thermique, il n'est pas absolument nécessaire de recourir à des absorbeurs sous vide. Ce type de collecteur présente en effet uniquement une interface transparente (lentille) et une interface absorbante. Une étude comparative avec un système parabolique 3D (voir paragraphe 3.2) montre de meilleures performances pour la lentille de Fresnel 3D [27].

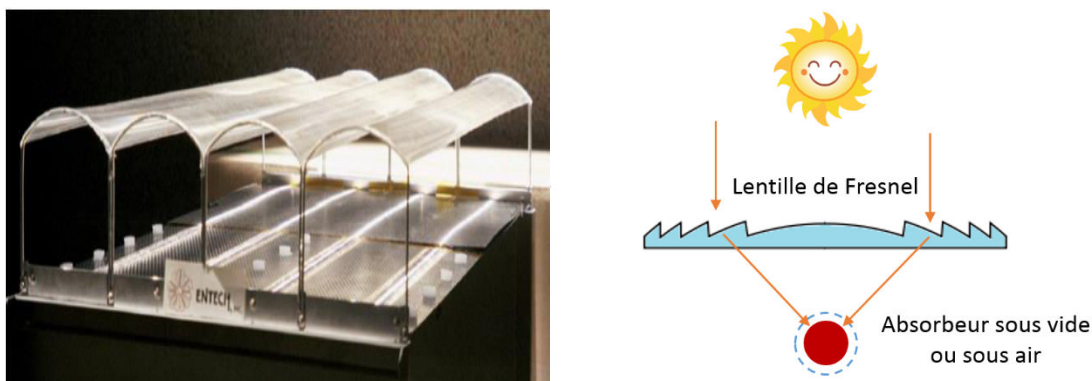


Figure 10 : Image d'un collecteur linéaire de Fresnel, USA

3.2. Collecteurs à concentration ponctuelle

Parabolique 3D

Un collecteur parabolique 3D, aussi appelé « dish », est un collecteur utilisant une parabole réfléchissante pour concentrer plusieurs centaines de fois la densité de flux solaire sur un absorbeur de petite surface placé à sa focale [39] (Figure 11). On retrouve cette géométrie depuis l'Antiquité, et notamment durant la Renaissance avec les premiers télescopes astronomiques [3]. Dans ce cas le collecteur doit suivre le Soleil sur deux axes. Avec un niveau de température très élevé allant jusqu'à 1000°C [40], sa principale utilisation est la conversion directe de la densité de flux solaire en énergie mécanique via un moteur Stirling (un moteur à énergie externe) [41], [42]. Deux dispositifs utilisant cette technologie sont implantés. Deux projets de puissance 1,5 MW chacun sont recensés [23]. Cette géométrie présente une surface réfléchissante et une surface absorbante (corps noir non idéal, constitué d'une cavité revêtue de parois absorbantes, placé au foyer de la parabole [43]).

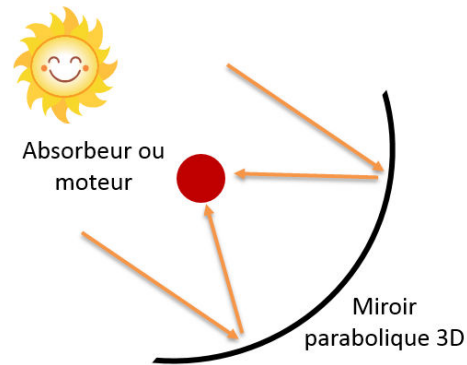


Figure 11 : Collecteur solaire parabolique 3D avec moteur Stirling basé à Almeria [23]

Centrale à tour

Dans le cas des centrales à tour, la densité de flux solaire est concentrée plusieurs centaines de fois à l'aide de miroirs quasi plans mobiles montés sur héliostats (suivi solaire sur 2 axes), sur un absorbeur placé au sommet d'une tour. Avec un unique absorbeur et des niveaux de température très élevés (565°C actuellement avec des sels fondus ou de la vapeur d'eau [40], 700 à 1000°C en développement [44]), ces centrales solaires ont un fonctionnement proche de celui des centrales thermodynamiques fossiles. Sauf cas particulier, on trouve une seule tour par centrale. Des recherches en cours visent à utiliser des fluides caloporteurs tels que de l'air sous pression ou des lits fluidisés pour une absorption directe [45], [46]. Fort d'un parc actuel de 600 MW, le parc de centrales solaires thermodynamiques à tour est le second le plus représenté mondialement. Il semble être promu à un bel avenir avec 430 MW en construction actuellement et 1200 MW prévus [23]. Dans ce type de configuration géométrique, nous retrouvons une surface réfléchissante et une surface absorbante de forme cylindrique (récepteur surfacique) ou en forme de cavité (récepteur volumique) ce qui permet d'accroître l'absorption par réflexions multiples à l'intérieur de la cavité.

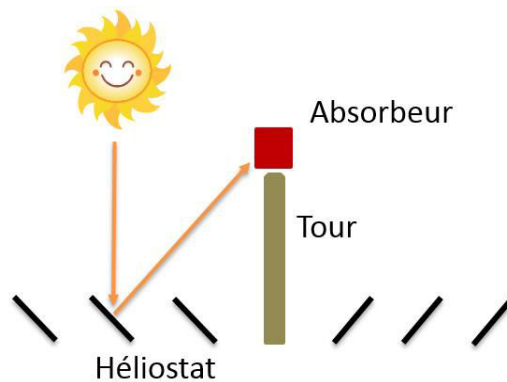


Figure 12 : Centrale solaire à tour PS10, Espagne PS10, Espagne [23]

Centrale à tour de type « Beam Down »

Cette variante de centrale solaire à tour cherche à placer l'absorbeur thermique au sol pour s'affranchir en partie de la construction relativement coûteuse d'une tour de plusieurs dizaines voire centaines de mètres de hauteur [47] et rapprocher géométriquement l'absorbeur thermique des turbines utilisées pour la conversion de la chaleur en électricité afin de réduire les pertes

thermiques liées au transport du fluide chaud dans la tuyauterie [39]. Afin d'assurer la collecte du rayonnement solaire réfléchi par les héliostats, un second miroir est placé en haut d'une tour de quelques mètres de haut pour réfléchir la densité de flux solaire au sol vers l'absorbeur, d'où le nom « beam-down » (rayons vers le bas). Les températures et le taux de concentration sont identiques aux centrales à tour classiques [48]. Ce type de collecteur présente deux surfaces réfléchissantes (héliostat, miroir secondaire) et une surface absorbante également souvent sous forme d'une cavité (Figure 13).

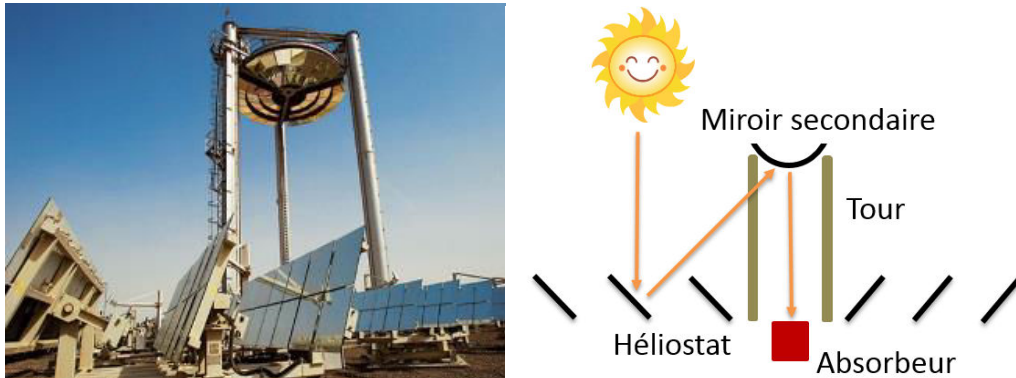


Figure 13 : Collecteur solaire à tour de type « Beam-Down » installé à Masdar (EAU)

Géométrie Cassegrain

La géométrie de Cassegrain est principalement associée à l'astronomie où elle est fréquemment utilisée dans des télescopes. Techniquement, la concentration s'effectue à l'aide de deux miroirs : le premier miroir de forme couronne concave réfléchit le rayonnement vers un second miroir qui renvoie le rayonnement vers l'absorbeur placé au centre de la couronne (Figure 14). Le taux de concentration maximum théorique d'un collecteur Cassegrain 3D est de l'ordre de 5000 [49], [50]. L'absorbeur peut ainsi être placé derrière les deux miroirs ce qui ne crée aucun ombrage et permet une isolation thermique directe. Toutes ces surfaces peuvent être recouvertes d'une vitre pour protéger l'ensemble. L'encrassement est donc limité et fortement localisé.

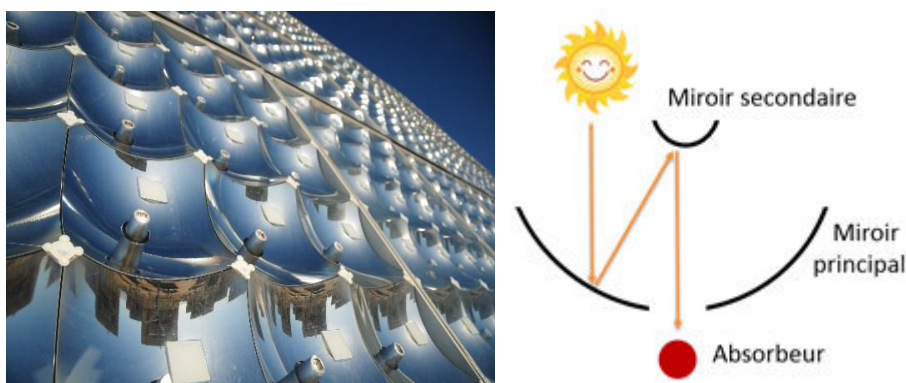


Figure 14 : A gauche, vision d'artiste d'un projet de collecteur photovoltaïque 3D. A droite, schéma de principe d'un collecteur Cassegrain thermique.

On retrouve plusieurs brevets et schémas techniques de concentrateur solaire thermique de Cassegrain, notamment avec des déploiements en corolle pour un usage spatial [39], [51].

Techniquement, on trouve quelques produits matures pour un usage photovoltaïque sous concentration. Nous n'en retrouvons pas pour un usage thermique, nous ne pouvons donc pas préciser de température d'utilisation. Compte tenu du taux de concentration, celle-ci serait similaire aux autres collecteurs 3D. Ce type de collecteur dispose de deux interfaces réfléchissantes (miroir principal et secondaire), de deux surfaces transparentes et d'une interface absorbante.

3.3. Synthèse

Un grand nombre de collecteurs solaires à concentration existent actuellement. La Table 1 synthétise les différentes technologies. Le nombre et le type d'interfaces de chaque collecteur sont donnés : interface réfléchissante (*R*), transparente (*T*) ou absorbante (*A*).

Table 1 : Synthèse du nombre d'interfaces présentes dans les différents types de collecteur solaire à concentration utilisables dans les centrales solaires thermodynamiques

Collecteur	Nombre et type d'interfaces			Concentration	Température
	<i>R</i>	<i>T</i>	<i>A</i>		
Cylindro-parabolique	1	1	1	80 à 100	300 à 550°C
Cylindro-parabolique CSP/PV	1	1	1	80 à 100	300 à 550°C
Miroir de Fresnel	2	1	1	25 à 100	300 à 550°C
Lentille de Fresnel	0	1	1	100	100 à 350°C
Heliotrope ®	2	2 à 3	1	10 à 120	100 à 350°C
GlassPoint ®	1	2	1	80 à 100	300 à 550°C
Heliovis ®	2	2	1	90 à 110	80 à 400°C
Parabolique 3D	1	0	1	> 1000	500 à 700°C
Tour	1	0	1	> 1000	500 à 700°C
"Beam down"	2	0	1	> 1000	500 à 700°C
Cassegrain	2	2	1	400	-

Toutes ces technologies de collecteurs solaires sont différentes par le nombre et la nature fonctionnelle des surfaces/interfaces qu'elles utilisent, leurs facteurs de concentration et leurs domaines de température de fonctionnement. Plusieurs éléments peuvent être mis en avant par cette première synthèse bibliographique :

1. Les surfaces absorbantes concernent toutes les technologies. Il s'agit donc de l'interface clef.
2. 10 technologies sur les 11 étudiées utilisent au moins une interface réfléchissante et 4 d'entre elles en utilisent deux. Il est donc important d'étudier l'effet de l'utilisation de plusieurs miroirs en série.
3. 8 technologies combinent une interface réfléchissante et une interface transparente. Il est donc nécessaire d'étudier ce type d'association.
4. 4 technologies utilisent plusieurs interfaces transparentes, souvent une interface plane puis un tube sous vide. Il est donc là aussi nécessaire d'étudier leurs interactions.
5. Les technologies cherchant à protéger leurs collecteurs (Heliotrope®, Heliovis®, GlassPoint® et les collecteurs de Cassegrain) ont toutes un nombre d'interfaces important

(de 4 à 6). Il est donc indispensable de suivre le spectre solaire interface après interface pour optimiser ces dernières en fonction du spectre réellement reçu par chaque interface.

Le choix des couches minces

Quelles que soient les fonctions optiques (réflexion, transparence et absorption spectralement sélective ou non) nécessaires au développement d'une géométrie de collecteur, celles-ci sont très souvent assurées par des revêtements ou des empilements d'une ou plusieurs couches minces (monocouches ou solutions plus complexes multicouches) déposées sur un support. Une couche mince est une fine épaisseur de matériau, de quelques nanomètres à quelques micromètres, déposée sur un support. Les couches minces permettent d'ajouter une fonctionnalité de surface (protection, tribologie, esthétisme, optique, etc.) tout en bénéficiant de la forme et des propriétés mécaniques du support. Elles sont donc présentes dans de très nombreux secteurs, y compris dans l'énergie solaire photovoltaïque et thermique. Pour l'énergie solaire thermique concentrée, nous retrouvons autant de couches minces différentes qu'il y a d'interfaces différentes. Pratiquement, les propriétés optiques qui assurent les performances du collecteur sont assurées par des couches minces, et non par les matériaux massifs supports [52]. Il peut s'agir par exemple d'un miroir composé d'une couche argent ou aluminium sur un support en verre, d'une couche antireflet sur tube en verre sous vide, ou d'un absorbeur multicouche sélectif sur support métallique pour une forte absorption dans le spectre solaire et une faible émissivité dans l'infrarouge.

Il est toutefois légitime de s'interroger sur leur intérêt. Les propriétés optiques peuvent-elles directement être assurées par le support ? En réalité, les propriétés nécessaires sont très particulières voire impossibles à réunir dans un unique matériau, ou bien le coût élevé de ce matériau empêche son utilisation sous forme massive. Il est donc nécessaire de recourir à des couches minces, ne serait-ce que pour la réduction des coûts. Par exemple, le métal le plus réfléchissant étant l'argent, on comprend aisément l'intérêt des techniques de dépôt de couches minces dans ce cas, car elles permettent de limiter les coûts en limitant la matière nécessaire à la fonction recherchée : une couche mince d'argent de quelques dizaines de nanomètres, déposée sur un support rigide en verre de plusieurs millimètres, aura en effet les mêmes propriétés optiques de surface qu'un miroir massif en argent, pour un coût bien moins élevé.

Dans notre travail nous cherchons à exploiter les différentes particularités et propriétés des couches minces afin d'identifier des solutions particulières, adaptées au solaire thermique à concentration. Pour cela nous cherchons à optimiser des solutions couches minces existantes en fonction des types de collecteurs solaires, et de différents spectres solaires issus de conditions météorologiques locales, le but étant de montrer qu'il est possible, ou non, d'améliorer les performances des surfaces utilisées dans ces collecteurs.

IV. Rôle des collecteurs sur les coûts et performances des centrales solaires

Nous nous sommes premièrement interrogés sur les performances actuelles des collecteurs solaires. Le but est de confirmer le rôle et l'importance des différentes surfaces et interfaces à la fois dans le prix d'investissement des centrales solaires, le prix de l'énergie produite et également leur impact sur les performances globales des centrales solaires. Mieux comprendre l'ensemble des problématiques de coût et performance des surfaces et interfaces solaires nous permettra de les optimiser au mieux. Nous terminerons par une étude des surfaces disponibles dans le commerce afin d'identifier les grandes tendances et les performances limites.

4.1. Part des surfaces collectrices sur le coût d'investissement des centrales solaires à concentration

Une centrale solaire à concentration intègre trois éléments principaux, illustrés sur la Figure 15 :

- Un champ solaire composé de collecteurs ayant pour rôle de capter et convertir l'énergie radiative du Soleil en chaleur pour chauffer un fluide caloporteur. Deux tiers des centrales utilisent des collecteurs cylindro-paraboliques, les autres utilisent des réflecteurs linéaires de Fresnel ou des tours.
- Un stockage (optionnel), de capacité variable, permettant d'atténuer les variations de puissance lors d'épisodes nuageux et d'étaler la production électrique au-delà des périodes d'ensoleillement.
- Un bloc puissance chargé de transformer l'énergie thermique en énergie électrique grâce à une turbine entraînant un alternateur.

Le coût d'investissement d'une centrale CSP est important [53]. Il est en effet nécessaire d'investir dans un champ solaire, de grandes quantités de fluide caloporteur, dans une unité de stockage, puis dans un bloc puissance (ensemble turbine et alternateur). Le coût total d'une centrale CSP à collecteurs cylindro-paraboliques ou à tour sans stockage est de l'ordre de 3 à 4 k€/kW_e produit [54] (kW_e : kW électrique).

Le coût du stockage sur l'investissement initial est quant à lui proportionnel à la durée de stockage souhaitée : de l'ordre de 30 à 40 €/kWh_{th} (kWh_{th} : kW thermique). Le coût total de l'installation augmente en conséquence et peut atteindre 6 à 8 k€/kW_e pour des centrales à tour permettant 12 à 15h de stockage [55]. Cet ajout a toutefois un effet positif en diminuant le prix de l'électricité produite, car il permet de produire en dehors des heures d'ensoleillement et lors des pics de consommation [55].

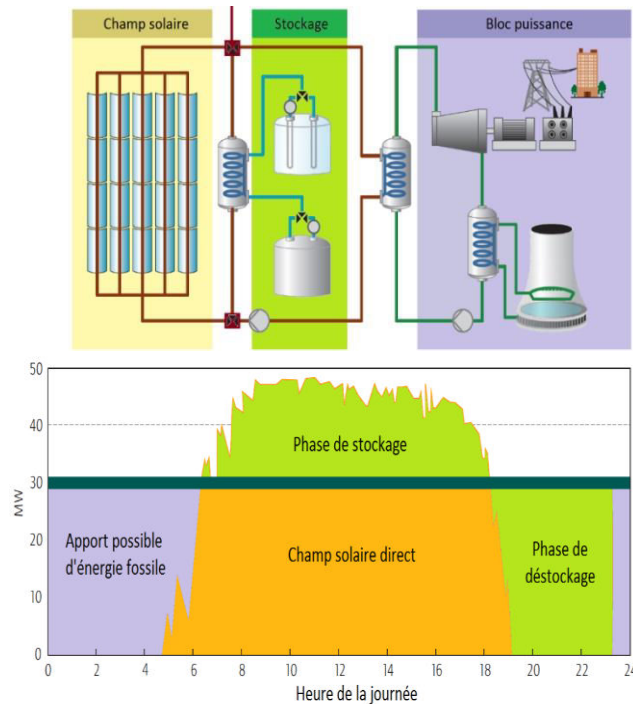


Figure 15 : Diagramme de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration

L'ensemble des investissements pour une centrale solaire est donc important comparé à d'autres technologies : éolien offshore (2,4 k€/kW_e), hydroélectricité (1,4 k€/kW_e), géothermie (1,2 k€/kW_e) [55]. L'investissement reste largement inférieur à celui pour les énergies fossiles, par exemple 0,4 k€/kW_e pour une turbine à gaz. Cependant dans ce cas il est nécessaire d'acheter du combustible pour produire ces kW_e, contrairement au cas des énergies renouvelables où la ressource est le plus souvent gratuite.

Si la répartition de l'investissement total pour une centrale solaire dépend du type de centrale, on remarque que le champ solaire représente toujours l'investissement le plus important d'une centrale, de l'ordre de 30% du coût total, que ce soit pour la technologie cylindro-parabolique ou pour les centrales à tour (Figure 16).

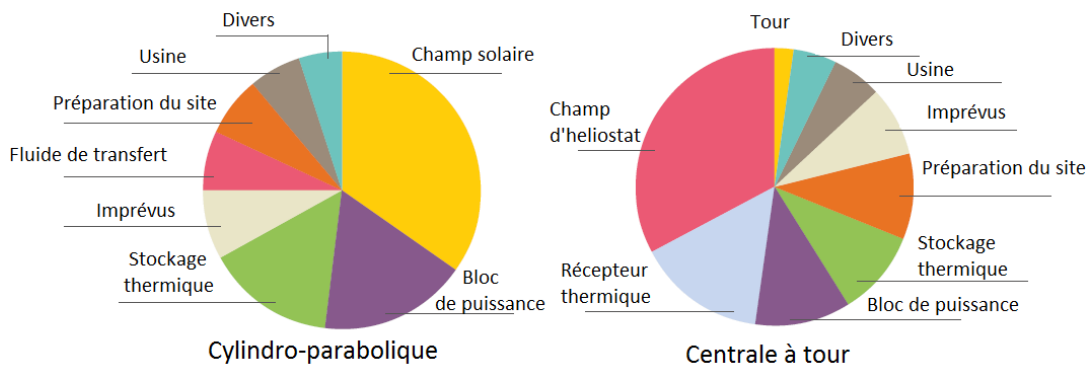


Figure 16 : Répartition schématique du prix d'investissement d'une centrale solaire [55]

Ce coût important s'explique par la taille du champ solaire nécessaire et par le prix de chaque élément. La bibliographie cite des surfaces de 400 000 à 510 000 m² de miroirs pour

une centrale de 50 MW_e, avec un stockage thermique de 7,5h [56]. Au total, le prix d'un champ solaire avoisine de 190 à 300 €/m² pour une centrale cylindro-parabolique (Figure 17) et de 100 à 200 €/m² pour une centrale à tour. Dans l'exemple montré sur la table de droite de la Figure 17 [55], on considère une centrale type Andasol en Espagne, avec 510 000 m² de miroirs d'ouverture 5,75 m. Dans ce cas, il faut environ 88 km de tubes absorbeurs et le récepteur thermique coûte 51€ par m² de miroir considéré (25,9 M€ au total), soit 292€ par mètre de tube absorbeur.

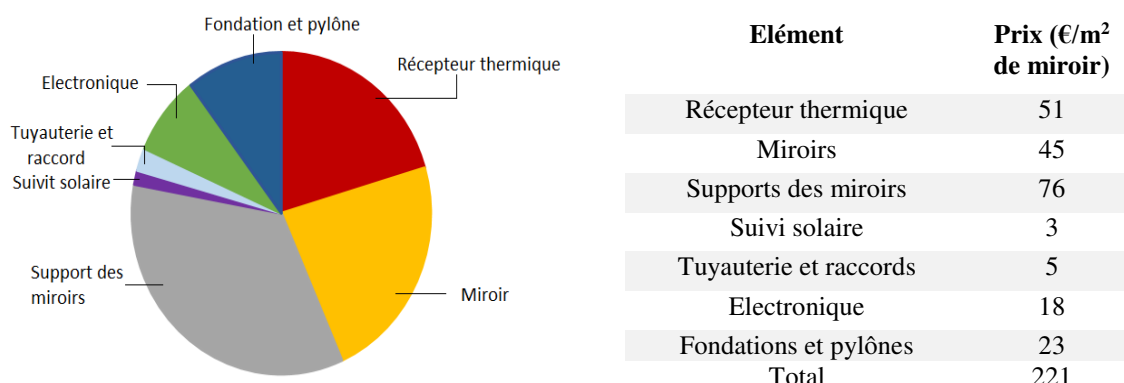


Figure 17 : A gauche, répartition du prix du champ solaire pour une centrale cylindro-parabolique. A droite, prix pour une centrale de 50MW_e avec 7,5h de stockage [55]

4.2. Impact des surfaces collectrices sur les performances des centrales solaires

Les centrales CSP affichent des niveaux de performances totales relativement bas, mais qui doivent être reliés à l'abondance et la gratuité de la ressource et au prix de vente de l'électricité souvent valorisé par le stockage thermique. Le rendement de conversion annuel de l'énergie solaire reçue en énergie électrique produite se situe entre 13,5 et 15% pour les technologies à collecteurs cylindro-paraboliques, et entre 13,7 et 16% pour des centrales à tour [47], [54]. On retrouve ainsi des chiffres du même ordre de grandeur que ceux de la filière silicium du PV ($\approx 18\text{-}20\%$) [57]. Les pertes peuvent être triées en plusieurs catégories, illustrées sur la Figure 18 où elles sont exprimées en % de la ressource solaire incidente disponible, pour deux types de centrales solaires (cylindro-parabolique et à tour).

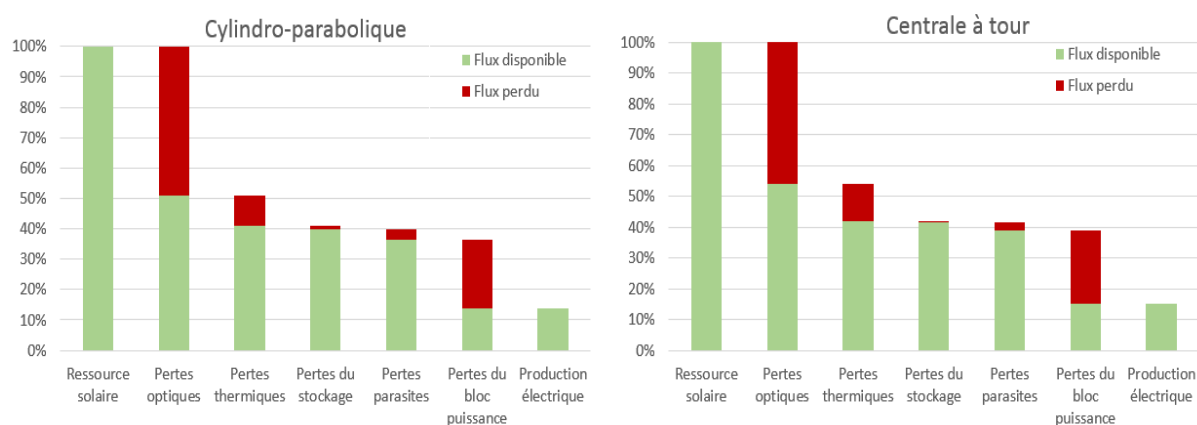


Figure 18 : Diagramme de répartitions des pertes dans les centrales CSP [47], [54]

- Les pertes optiques correspondent au rapport entre le flux solaire réellement absorbé par l'absorbeur et le flux solaire incident disponible. Elles prennent donc en compte toutes les pertes optiques dues à l'imperfection des différentes surfaces et interfaces telles que les miroirs, les verres et les absorbeurs. En effet, un miroir n'aura pas une réflectivité solaire de 100% (pertes par absorption ou diffusion), un verre n'aura pas une transmittivité solaire de 100% (pertes par réflexion), et un absorbeur n'aura pas une absorptivité solaire de 100% (pertes par réflexion et transmission). En plus des pertes optiques intrinsèques des surfaces collectrices, il est également nécessaire de rajouter les pertes optiques à l'échelle des composants et du système. Elles sont dues par exemple à un mauvais suivi solaire, à l'encrassement des collecteurs (miroirs et tubes sous vide) par les poussières amenées par le vent et la pluie, au vieillissement des composants, à l'ombrage (masquage de certains composants par le relief et la végétation ou par d'autres composants de la centrale), ainsi que les pertes dues à l'écart entre la position du Soleil et l'axe d'installation des collecteurs (pour ceux ayant un suivi solaire un axe), aussi nommé effet cosinus [3], [58]. Afin d'y remédier, nous évaluerons et nous proposerons des empilements de couches minces spécifiquement conçus pour des angles d'incidence non normaux ».
- Les pertes thermiques correspondent au rapport entre le flux solaire absorbé et le flux thermique transmis au fluide caloporteur et parvenant jusqu'à l'échangeur thermique (pour la production de vapeur) et/ou au stockage. Ces pertes thermiques sont principalement dues au rayonnement infrarouge des absorbeurs solaires chauds, puis à la conduction dans l'isolant des tuyaux chargés de transporter le fluide caloporteur entre l'absorbeur et l'échangeur ou le stockage. La convection naturelle et forcée (vent) avec l'air ambiant peut aussi être source de pertes thermiques, en particulier si l'absorbeur n'est pas maintenu sous vide.
- Les pertes du stockage correspondent à la différence entre le flux thermique stocké et celui qui peut être déstocké.
- Les pertes parasites correspondent quant à elles à l'énergie autoconsommée par la centrale (pompes, suivi solaire, etc.) pour en assurer le fonctionnement, ainsi qu'aux pertes de charge aux échangeurs thermiques.
- Les pertes du bloc puissance correspondent finalement à la différence entre le flux disponible sous forme de chaleur et le flux produit sous forme électrique. Une grande partie de ces pertes est intrinsèque aux limites théoriques imposées par la thermodynamique (voir rendement de Carnot, chapitre VII).

La Figure 18 montre que malgré un principe de fonctionnement différent, les pertes sont uniformément réparties pour des centrales utilisant des collecteurs différents. Si les chiffres varient selon les publications et les technologies, ils restent toujours répartis identiquement. La première source de pertes est d'origine optique, avec un taux d'énergie absorbée proche de seulement 50%. Le champ solaire représente donc non seulement la partie la plus coûteuse d'une centrale, mais correspond aussi à la source principale de pertes et de limitation du rendement global de la centrale.

À titre d'exemple, une centrale solaire de type Andasol en Espagne (50 MW_e, collecteurs cylindro-paraboliques ; 7,5 heures de stockage) reçoit une insolation directe de 2200 kWh/m²/an sur 510 000 m² de miroirs solaires, soit un total d'environ 1100 GWh par an. Avec cette énergie disponible, la centrale produit 175 GWh_e soit un rendement solaire-électrique approximatif de 16%. Une augmentation de seulement 0,1% des performances optiques de la centrale permettrait de valoriser 1100 MWh_{th} soit 175 MWh_e supplémentaires. C'est face à ce constat que nous avons choisi de travailler sur l'optimisation des interfaces réfléchissantes, transparentes et absorbantes, afin de montrer sur des exemples choisis la possibilité d'augmenter la densité du flux solaire absorbé par unité d'aire de collecteur déployé. Ainsi, si la capacité de production électrique annuelle d'une centrale augmente, le temps de retour sur investissement diminue et la technologie devient plus avantageuse.

4.3. Caractéristiques des collecteurs commerciaux de l'industrie CSP

Un certain nombre de fabricants propose sur le marché des composants clés en main standardisés pour les centrales solaires, uniquement pour la technologie cylindro-parabolique. Cette partie présente les caractéristiques de certains de ces composants. Elles sont issues de calculs réalisés à l'aide du logiciel de dimensionnement System Advisor Model (SAM) du NREL [57], ainsi que de données complémentaires fournies par les fabricants [59], [60]. Ces données ne sont donc pas exhaustives. Les centrales à tour, bien que déjà déployées, n'ont quant à elles pas à notre connaissance de composants standards. Nous nous limiterons donc dans ce qui suit aux données accessibles pour les produits clé en main de la filière cylindro-parabolique.

Concentrateurs solaires à géométrie cylindro-parabolique

Nous avons dénombré sept fabricants proposant un total de huit modèles de concentrateurs (miroirs et leurs structures) pour le marché des centrales à collecteurs cylindro-paraboliques. La Table 2 reprend les différentes caractéristiques de ces concentrateurs. Les longues lignes de collecteurs (de 50 à 150 m) constituant une centrale solaire sont subdivisées en plusieurs petits modules (de 6 à 12, en fonction du type de concentrateur) pouvant être pilotés individuellement. La longueur des modules dépend du nombre d'absorbeurs thermiques utilisés, généralement entre deux et trois.

Les valeurs de pertes montrées sur la Table 2 sont issues de SAM [57] et expriment la part d'énergie conservée en tenant compte du type de perte considéré : erreurs de tracking (suivi solaire), optique, de géométrie, encrassement, etc. Par exemple entre 99,4% et 98,8% du flux solaire incident est conservé après les erreurs de tracking, soit 0,6% à 1,2% de pertes. Les réflectivités solaires initiales, calculées à partir du spectre solaire de référence ASTM G173-3 DC (voir paragraphe 5.1) varient peu en fonction du fournisseur du collecteur. Les valeurs d'encrassement sont des valeurs moyennes indiquées dans SAM [57] en tenant compte de 60 lavages par an, consommant chacun 0,7 litres d'eau par m² de collecteur déployé. Ces valeurs représentent les pertes de réflectivité des miroirs à cause des poussières, des micro-débris ou du sable qui s'y déposent. Plusieurs études montrent que l'encrassement est une problématique complexe et extrêmement variable en fréquence et en intensité selon le lieu d'installation [61],

[62]. Tous ces produits ont des performances optiques (produit des valeurs de la Table 2) très similaires, comprises d'après SAM entre 85,3 et 88,3% [57].

Table 2 : Caractéristiques des concentrateurs cylindro-paraboliques sur le marché en 2017
[57]

Modèle / Dimensions	Longueur	Ouverture	Surface	Focale	Nombre de modules	Distance intermodules
Solargenix SGX-1	100 m	5,00 m	470 m ²	1,80 m	12	1 m
SkyFuel	115 m	6,00 m	656 m ²	2,15 m	8	1 m
Luz LS-3	100 m	5,75 m	545 m ²	2,10 m	12	1 m
Luz LS-2	49 m	5,00 m	235 m ²	1,80 m	6	1 m
EuroThrough ET150	150 m	5,75 m	818 m ²	2,11 m	12	1 m
Siemens SunField 6	95 m	5,77 m	545 m ²	2,17 m	8	0.8
AlbiasaTrough AT150	150 m	5,77 m	818 m ²	2,10 m	12	1
Flabeg UT RP6	247 m	7,53 m	1720 m ²	2,38 m	10	1,5 m
Modèle / Sources de pertes	Erreur de tracking	Effet géométrique	Erreur optique	Réflectance solaire	Encrassement	Rendement optique total
Solargenix SGX-1	0,994	0,980	0,990	0,935	0,950	0,857
SkyFuel	0,988	0,952	1,000	0,930	0,975	0,853
Luz LS-3	0,990	0,980	0,990	0,935	0,950	0,853
Luz LS-2	0,990	0,980	0,990	0,935	0,950	0,853
EuroThrough ET150	0,990	0,980	0,990	0,935	0,950	0,853
Siemens SunField 6	0,990	0,968	1,000	0,925	0,970	0,860
AlbiasaTrough AT150	0,990	0,980	0,990	0,935	0,950	0,853
Flabeg UT RP6	0,998	0,97	1,000	0,940	0,970	0,883

Absorbeurs solaires linéaires sous vide

Les tubes absorbeurs solaires sous vide sont des composants clefs des centrales CSP utilisant une concentration linéaire (2D). Ils ont pour rôle d'absorber le rayonnement solaire concentré pour augmenter la température d'un fluide caloporteur qui circule à l'intérieur du tube. Nous retiendrons les températures standards d'utilisation comprises entre 300 et 350°C pour les huiles minérales solaires, et de 500 à 600°C pour les sels fondus [57]. Les absorbeurs sont constitués d'un tube en acier revêtu d'un traitement dit "sélectif", c'est-à-dire absorbant dans la partie visible du spectre solaire et faiblement émetteur dans l'infrarouge ce qui limite les pertes thermiques radiatives. De plus, le tube d'acier est maintenu sous vide à l'intérieur d'un tube en verre, ce qui permet d'éliminer les pertes thermiques par convection avec l'air ambiant. L'ensemble est fixé grâce à une soudure verre-métal sur un raccord et un soufflet permettant d'accommoder les différences de dilatation entre le verre et le métal, comme indiqué sur la Figure 19.

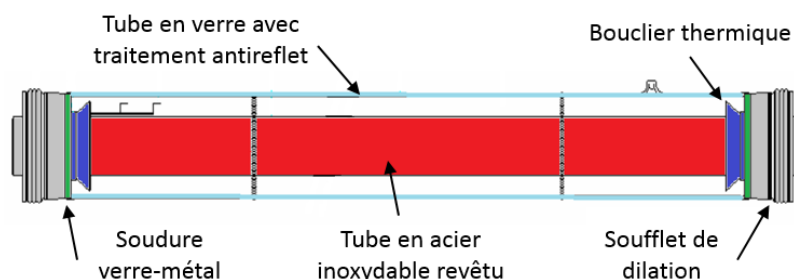


Figure 19 : Schéma d'un absorbeur solaire sous vide

Une dizaine de produits de ce type est fourni par sept constructeurs (Table 3). Les pertes thermiques et l'émittance Corps Noir (CN, définie dans le paragraphe 5.2) sont données pour 350°C (limite haute des huiles thermiques), sauf pour le fournisseur Archimede (300°C [63]).

Table 3 : Absorbeurs solaires sous vide sur le marché entre 2014 et 2017 [57]

Nom du produit	Pertes thermiques à 350 °C	Diamètre tube en acier	Absorptance solaire (acier revêtu)	Emittance CN 350°C (acier revêtu)	Transmittance solaire (verre)
Schott PTR70	190 W/m	70 mm	0,96	0,1549	0,963
Schott PTR70 2008	150 W/m	70 mm	0,96	0,0865	0,963
Solel UVAC 3	175 W/m	70 mm	0,96	0,0896	0,96
Siemens UVAC 2010	192 W/m	70 mm	0,96	0,1015	0,96
Schott PTR80	190 W/m	80 mm	0,963	0,0865	0,964
RioGlass UVAC 70-7G	-	70 mm	0,962	<0,095	0,967
RioGlass UVAC 90-7G	-	90 mm	0,962	<0,095	0,967
RioGlass PTR 70-4G	-	70 mm	>0,94	<0,095	>0,97
Royal Tech CSP	175 W/m	70 mm	0,953	0,0847	0,955
Beaconergy	171 W/m	32 mm	0,955	< 0,1	> 0,97
Archimede HCEMS-11	150 W/m	70 mm	> 0,95	<0,073	>0,965
Archimede HCESHS-12					
Archimede HCEOI-12	150 W/m	70 mm	> 0,96	<0,085	>0,965

Les absorptances solaires du tube en acier revêtu sont relativement similaires avec un écart maximum de 1% entre les produits. Les émittances "corps noir" varient d'avantage. Les transmittances solaires du tube en verre sont relativement similaires : 95,5% à 96,7% selon le fournisseur. Deux effets optiques sont également à prendre en compte : un ombrage du tube sur le collecteur (4% de pertes) et un encrassement du verre (2% de pertes, toujours selon SAM [57]). Ces absorbeurs sous vide présentent un rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie thermique compris entre 86,5 et 87,3% [57].

Centrales à tour

Concernant les héliostats des centrales à tour, il n'existe pas à notre connaissance de produit clef en main standardisé. Toutefois on retrouve des valeurs similaires pour la réflectivité initiale et l'encrassement des miroirs, et pour l'erreur de suivi solaire. Les effets géométriques et les erreurs optiques sont quant à eux différents. Ils sont principalement fonction de la disposition du champ d'héliostats. D'autres caractéristiques sont propres à cette technologie, comme l'absorption du flux solaire par l'atmosphère en raison de la distance parfois importante (> 1 km) entre l'héliostat et l'absorbeur thermique [64].

Bilan sur les composants commerciaux

L'analyse des composants pour le CSP proposés par l'industrie permet un premier état de l'art des performances que l'on peut atteindre aujourd'hui à grande échelle (Table 4). Actuellement les performances des collecteurs solaires complets composés d'un miroir, d'un tube sous vide et d'un absorbeur thermique varient donc de 73 à 75% (produits des performances solaires des Tables 2 à 4).

Table 4 : Résumé des performances solaires des composants industriels

Type de composant	Propriété optique	Performance
Concentrateur	Réflectance solaire initiale	92,5 à 93,5%
Tube absorbeur sous vide	Transmittance solaire du tube en verre	96 à 97%
	Absorptance solaire	95,5 à 96,7%
	Emittance corps noir à 350°C	9 à 10%

4.4. Conclusions

Le champ solaire d'une centrale CSP, qui représente l'investissement le plus coûteux, présente donc des performances pouvant encore a priori être améliorées. Une analyse montre que la qualité du champ solaire a un impact direct et très important sur la quantité d'énergie produite et sur son prix [65]. À titre indicatif, le coût actualisé de l'énergie (LCOE) solaire est compris entre 0,15 et 0,19 €/kWh (pour 2000 kWh/an de flux solaire direct (DNI)). Certains types de collecteurs tels que ceux à Réflecteur Linéaire de Fresnel permettent de réduire les coûts d'investissement (2 k€/kW_e) avec un LCOE similaire [56].

L'ensemble des problématiques pouvant conduire à une amélioration des performances et à une réduction des coûts d'investissement et de production de chaleur et d'électricité solaires CSP est un sujet crucial pour le développement de la filière et justifie ces travaux de recherche. Une optimisation des performances de chaque fonction optique, assurée par les surfaces collectrices et dépendantes donc de leurs fonctionnalisations (via par exemple des couches minces), peut donc être envisagée afin que chaque champ solaire soit adapté au mieux, en s'éloignant des solutions des standards commerciaux, aux conditions locales d'ensoleillement. Sur la base d'exemples, ceci fait l'objet des chapitres IV à VI, qui traitent chacun de l'une des trois fonctions principales (réflexion, transmission et absorption du rayonnement solaire).

V. Eléments d'optique de base

Afin de mener à bien nos travaux, il est nécessaire de comprendre les différents mécanismes d'interactions entre la lumière (densité de flux solaire) et les matériaux déposés en faible épaisseur (couches minces) sur des matériaux supports (substrats). Les principales notions utiles à la compréhension du manuscrit sont rappelées ici.

5.1. Performances optiques spectrales des surfaces

Loi de conservation de l'énergie en optique

Les propriétés optiques découlent de la loi de conservation de l'énergie, qui est un principe fondamental de la physique. Cette dernière stipule que l'énergie d'un système isolé est invariante au cours du temps, et qu'aucune perte, disparition ou création d'énergie ne peut avoir lieu au sein d'un système dans un référentiel inertiel. On observe uniquement des

transformations. Ce principe s'applique à un rayonnement incident sur un matériau, qui est soit réfléchi (R), soit absorbé (A) soit transmis (T) (équation (I-1)). Le rayonnement est incident dans un angle solide déterminé par un angle d'incidence θ et un angle azimutal ψ et à une longueur d'onde donnée λ . Le matériau est à une température fixe T_e . On obtient l'équation suivante :

$$A(T_e, \theta, \psi, \lambda) + R(T_e, \theta, \psi, \lambda) + T(T_e, \theta, \psi, \lambda) = 1 \quad (\text{I-1})$$

Le système stocke de l'énergie en absorbant une partie du flux incident. Tant que le corps étudié est en équilibre thermique avec son environnement (c'est-à-dire que sa température reste constante à T_e), il ne peut être sujet à aucun gradient thermique, production de chaleur, mécanisme de phosphorescence, etc. Il redistribue donc obligatoirement l'énergie disponible à son environnement. Le flux émis est appelé émittance (notée E) ; la loi du rayonnement de Kirchhoff le lie au flux absorbé (équation (I-2)).

$$A(T_e, \theta, \psi, \lambda) = E(T_e, \theta, \psi, \lambda) \quad (\text{I-2})$$

Fonctions spectrales

L'évolution d'un des paramètres optiques (réflectance R , transmittance T ou absorptance A) avec une ou plusieurs variables (T_e , θ , ψ et λ) est représentée par une fonction. Dans nos calculs, nous imposerons une température T_e constante afin de vérifier l'égalité de Kirchhoff (I-2), ce qui rend caduque l'étude d'un paramètre en fonction de la température. De même, les angles d'incidence θ et azimutal ψ du rayonnement sur une surface seront fixés (incidence normale $\theta = 0^\circ$) sauf indication contraire. Dans notre cas, l'étude ayant le plus d'intérêt est l'évolution des paramètres optiques R , T et A en fonction de la longueur d'onde λ . Nous parlerons alors de fonction spectrale. Dans notre manuscrit nous ferons appel à deux types de fonctions spectrales. Plus de détails sont disponibles dans les annexes (§1.1, p.283).

- Pour les propriétés intrinsèques d'un matériau, nous utilisons les termes de réflectivité $\rho(\lambda)$, transmittivité $\tau(\lambda)$ et absorptivité $\alpha(\lambda)$ spectrales.
- Pour les propriétés d'un échantillon ou d'une surface particulière de ce matériau, nous utilisons les termes de réflectance $R(\lambda)$, transmittance $T(\lambda)$ et absorptance $A(\lambda)$ spectrales.

5.2. Rendements solaire et thermique des surfaces

Rendement solaire d'une surface

Nous définissons le rendement solaire (génériquement noté η_s) d'une surface optique comme le rapport entre la densité de flux (W/m^2) solaire disponible après interaction avec la surface (notée J_d , en W/m^2) et la densité de flux solaire incidente (notée J_i , en W/m^2). La densité de flux solaire reçue est aussi appelée irradiance ou éclaircissement. Le calcul de la densité de flux J_i s'effectue par intégration d'un spectre solaire (irradiance spectrale en $\text{W/m}^2/\text{nm}$), sur tout le domaine spectral. Il s'agit de l'aire en jaune sur la Figure 20, notée $E_{sol}(\lambda)$ plus loin. L'intégration en longueur d'onde sur tout le spectre conduit à une densité de flux solaire incident

en W/m². Le spectre solaire ASTM G173-03 Direct + Circumsolaire (DC), visible sur la Figure 20, est utilisé en standard dans l'ensemble de la bibliographie, ainsi que dans les normes ISO n°9050 [66] et n°9845 [67].

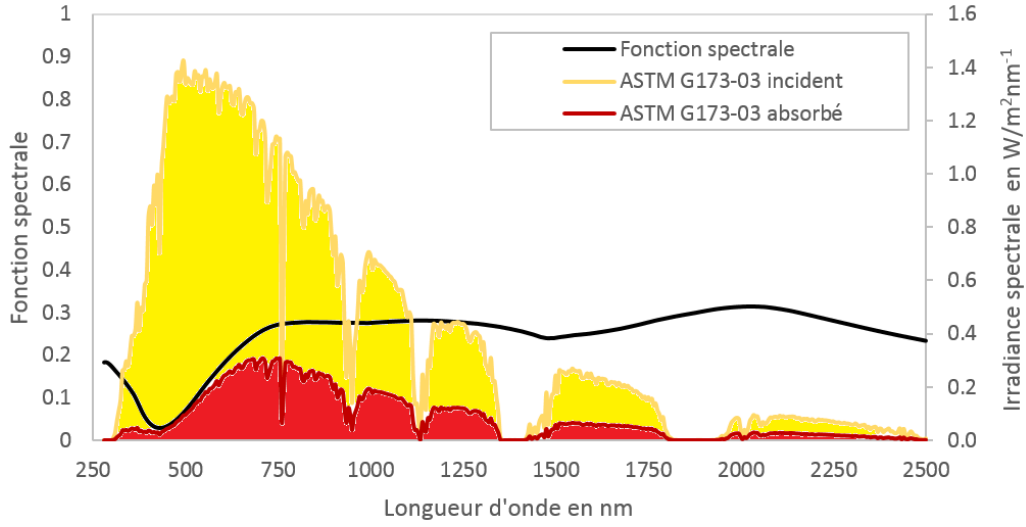


Figure 20 : Exemple de calcul d'un rendement solaire

Le calcul de la densité de flux disponible après interaction avec la surface (J_d) s'effectue en intégrant le produit d'une fonction spectrale $f(\lambda)$ par l'irradiance spectrale solaire incidente (en W/m²/nm). La fonction spectrale correspond à l'une des trois propriétés optiques : réflectance R , transmittance T ou absorptance A . Elle est illustrée par la courbe noire sur la Figure 20. J_d correspond à l'aire en orange foncé sur la Figure 20 dans le cas d'une absorption. Le rapport J_d/J_i permet de déterminer le rendement solaire, c'est-à-dire la part de densité de flux réellement réfléchi, transmise ou absorbée par la surface par rapport à la densité de flux solaire incidente (relation (I-3)).

$$\eta_s = \frac{J_d}{J_i} = \frac{\int_0^\infty f(\lambda) \cdot E_{sol}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^\infty E_{sol}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (I-3)$$

En réalité, les fonctions spectrales et le spectre solaire sont des valeurs discrètes bornées, souvent issues de mesures optiques : la fonction spectrale n'est pas continue et est comprise entre deux valeurs limites de longueur d'onde, λ_1 et λ_2 . Par exemple le spectre solaire sera compris entre $\lambda_1 = 280$ nm et $\lambda_2 = 2500$ nm, et les valeurs d'irradiance seront données par pas $\Delta\lambda = 5$ nm. Pratiquement, l'intégration est donc plutôt effectuée par sommation et le rendement solaire est donné par l'équation (I-4) [67], [68].

$$\eta_s = \frac{J_d}{J_i} = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) \cdot E_{sol}(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{sol}(\lambda) \Delta\lambda} \quad (I-4)$$

Nous noterons et nommerons par la suite le rapport J_d/J_i comme la grandeur optique considérée (R , T ou A) à laquelle nous rajouterons l'adjectif solaire et l'indice s . Ainsi, par

exemple, la réflectance solaire s'écrit R_s et correspond à la densité de flux réfléchi, calculée par l'équation (I-5), où $R(\lambda)$ est la réflectance spectrale.

$$R_s = \frac{\sum_{280\text{ nm}}^{2500\text{ nm}} R(\lambda) \cdot E_{sol}(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{280\text{ nm}}^{2500\text{ nm}} E_{sol}(\lambda) \Delta\lambda} \quad (\text{I-5})$$

Rendement solaire d'un ensemble de surfaces en série

Pour plusieurs surfaces en série, comme c'est le cas dans un collecteur solaire complet, le spectre et donc la densité de flux solaires reçus par la seconde surface rencontrée ne sont plus le spectre et la densité de flux solaire incident (J_i) reçus par la première surface, mais le spectre et la densité de flux solaires disponibles issus de la première surface (J_1^d), et ainsi de suite pour les surfaces suivantes. Par exemple, pour un miroir réfléchissant le spectre solaire incident vers un absorbeur thermique, le rendement de l'absorbeur doit être calculé par rapport au spectre et à la densité de flux solaires réfléchis par le miroir (J_1^d) et non au spectre solaire incident (J_i). Cette démarche permet de calculer précisément les performances solaires $\eta_{s\ 1 \rightarrow n}$ d'un ensemble de n surfaces en série, selon l'équation (I-6).

$$\eta_{s\ 1 \rightarrow n} = \prod_{i=1}^{n-1} \eta_{s\ i \rightarrow i+1} = \frac{J_1^d}{J_i} \cdot \frac{J_2^d}{J_1^d} \cdot \dots \cdot \frac{J_n^d}{J_{n-1}^d} = \frac{J_n^d}{J_i} \quad (\text{I-6})$$

Par exemple, pour $n = 2$ surfaces/interfaces successives, nous obtenons l'équation (I-7).

$$\begin{aligned} \eta_{s\ 1 \rightarrow 2} &= \frac{J_1^d}{J_i} \cdot \frac{J_2^d}{J_1^d} = \frac{\int_0^\infty f_1(\lambda) \cdot E_{sol}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E_{sol}(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int_0^\infty f_1(\lambda) \cdot f_2(\lambda) \cdot E_{sol}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty f_1(\lambda) \cdot E_{sol}(\lambda) d\lambda} \\ &= \frac{\int_0^\infty f_1(\lambda) \cdot f_2(\lambda) \cdot E_{sol}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E_{sol}(\lambda) d\lambda} \end{aligned} \quad (\text{I-7})$$

Une autre démarche, pourtant moins exacte, est couramment employée pour le calcul des performances d'un assemblage de plusieurs surfaces, tel qu'un collecteur solaire complet. Cette autre démarche fait l'approximation que la performance solaire globale du collecteur est le simple produit des rendements solaires de chaque surface prise séparément, tous calculés par rapport aux mêmes spectre et densité de flux solaires incidents (J_i). Un exemple de ce deuxième type de calcul est montré pour deux surfaces dans l'équation (I-8), différente de l'expression exacte I-7.

$$\eta_{s\ 1 \rightarrow 2} = \frac{J_1^d}{J_i} \cdot \frac{J_2^d}{J_i} = \frac{\int_0^\infty f_1(\lambda) \cdot E_{sol}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E_{sol}(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int_0^\infty f_2(\lambda) \cdot E_{sol}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty E_{sol}(\lambda) d\lambda} \quad (\text{I-8})$$

L'erreur générée par l'approximation est proportionnelle à la différence entre les fonctions $f_1(\lambda)$ et $f_2(\lambda)$ correspondant aux deux surfaces considérées. Des calculs effectués dans les chapitres IV à VI montrent que l'erreur commise avec l'approximation n'est pas négligeable, mais qu'elle reste en général inférieure à 1%, sauf cas particulier.

Rendement thermique d'une surface

Afin de quantifier les pertes thermiques radiatives d'une surface, nous définissons le rendement thermique (noté η_t) comme étant le rapport entre la densité de flux J_{em} (W/m^2) émise par la surface à la température T_e et la densité de flux J_{CN} qu'émettrait un corps noir à la même température (équation (I-9)). Pratiquement, il se calcule de façon identique à une performance solaire, sauf que l'irradiance spectrale $E_{CN}(\lambda, T_e)$ ($W/m^2/nm$) d'un corps noir devient le spectre de référence au lieu du spectre solaire. La fonction spectrale utilisée pour le calcul est l'absorptivité ou l'absorptance spectrales ($\alpha(\lambda, T_e)$ ou $A(\lambda, T_e)$), qui équivalent à l'émissivité ou l'émittance spectrales ($\varepsilon(\lambda, T_e)$ ou $E(\lambda, T_e)$) d'après la loi du rayonnement de Kirchhoff (I-2).

$$\eta_t = \frac{J_{em}}{J_{CN}} = \frac{\int_0^\infty \alpha(\lambda, T_e) \cdot E_{CN}(\lambda, T_e) d\lambda}{\int_0^\infty E_{CN}(\lambda, T_e) d\lambda} \quad (I-9)$$

Une même absorptance spectrale peut mener à des rendements thermiques différents selon la température T_e considérée, qui sera par exemple celle de l'absorbeur (T_{abs}). Comme pour un rendement solaire, l'intégration est souvent résolue par sommation, tel que décrit par l'équation (I-10).

$$\eta_t \equiv E_{CN}(T_{abs}) = \frac{\sum_{i=0}^{30 \mu m} \alpha(\lambda) \cdot E_{CN}(\lambda, T_{abs}) \Delta\lambda}{\sum_{i=0}^{30 \mu m} E_{CN}(\lambda, T_{abs}) \Delta\lambda} \quad (I-10)$$

Le rendement thermique est aussi appelé émittance thermique (E_{th}) ou émittance corps noir (E_{CN}) dans la bibliographie. Nous utiliserons plutôt l'appellation émittance corps noir pour distinguer clairement cette grandeur intégrée en longueur d'onde de l'émittance spectrale $E(\lambda, T)$. Une émittance corps noir est un nombre adimensionnel compris entre 0 et 1, directement lié à une température. L'application de la loi de Stefan-Boltzmann ($E_{CN}(T_{abs}) \cdot \sigma T_{abs}^4$) permet de remonter à la densité de flux émise par la surface.

Rendement héliothermique d'une surface absorbante

A partir de la densité de flux solaire absorbée ($\Phi_{absorbé}$) et de la densité de flux émise par une surface ($\Phi_{émis}$), il est possible de déterminer la densité de flux solaire nette J' , c'est-à-dire la densité de flux réellement disponible après soustraction des pertes thermiques radiatives de l'absorbeur ($\Phi_{absorbé} - \Phi_{émis}$). En rapportant la densité de flux solaire nette à la densité de flux solaire incidente concentrée ($C \cdot J_i$), nous pouvons définir le rendement héliothermique η_{th} d'un absorbeur selon l'équation (I-11). Il correspond à l'efficacité de conversion d'une densité de flux radiatif solaire incident en une densité de flux thermique, pour une température d'absorbeur T_{abs} donnée. Le rendement héliothermique d'un absorbeur dépend des propriétés solaires (A_s , équation I-4 avec $f(\lambda) = A(\lambda)$) et thermiques ($E_{CN}(T_{abs})$, équation (I-10)) de la surface, du taux de concentration solaire du système (C) et de la température extérieure (T_0).

$$\eta_{th} = \frac{J'}{C \cdot J_i} = \frac{\Phi_{absorbé} - \Phi_{émis}}{C \cdot J_i} = \frac{r_{opt} \cdot A_s \cdot C \cdot J_i - E_{CN}(T_{abs}) \cdot \sigma \cdot (T_{abs}^4 - T_0^4)}{r_{opt} \cdot C \cdot J_i} \quad (I-11)$$

Le rendement optique r_{Opt} dans l'expression du rendement héliothermique est un nombre adimensionnel qui représente l'ensemble des pertes optiques en amont de l'absorbeur et ne dépendant pas de la longueur d'onde. Par exemple, nous pouvons citer : l'effet cosinus, l'encrassement des surfaces, l'ombrage de certains composants, etc. Nous utilisons une valeur de 0,7 ; valeur adoptée au début de notre thèse que nous avons ensuite conservée pour garder le bénéfice de nos travaux. Dans la bibliographie, nous avons relevé des valeurs comprises entre 0,6 et 0,8 [69].

La Figure 21 illustre les différents éléments de l'équation (I-11) pour l'exemple d'un absorbeur recouvert d'un empilement de couches minces à sélectivité spectrale (faible réflexion solaire, forte réflexion infrarouge). La fonction spectrale d'intérêt est donc ici l'absorptance $A(\lambda)$. Sur la figure, c'est la réflectance spectrale qui est tracée (courbe noire), correspondant à $1 - A(\lambda)$ car l'empilement est opaque ($T(\lambda) = 0$). La densité absorbée de flux solaire concentré $\Phi_{absorbé}$ fait intervenir l'absorptance solaire A_s , qui elle-même correspond au rapport de l'aire en rouge (densité absorbée de flux solaire non concentré) sur l'aire en jaune (densité de flux solaire incident non concentré). Le flux émis $\Phi_{émis}$ fait intervenir quant à lui l'émissance corps noir $ECN(T_{abs})$ calculée à la température de l'absorbeur T_{abs} selon l'équation (I-10). $ECN(T_{abs})$ correspond à l'aire en bleu foncé (densité de flux émise par l'absorbeur à T_{abs}) divisée par l'aire en bleu clair (densité de flux émise par le corps noir à $T_{abs} = 550^\circ\text{C}$).

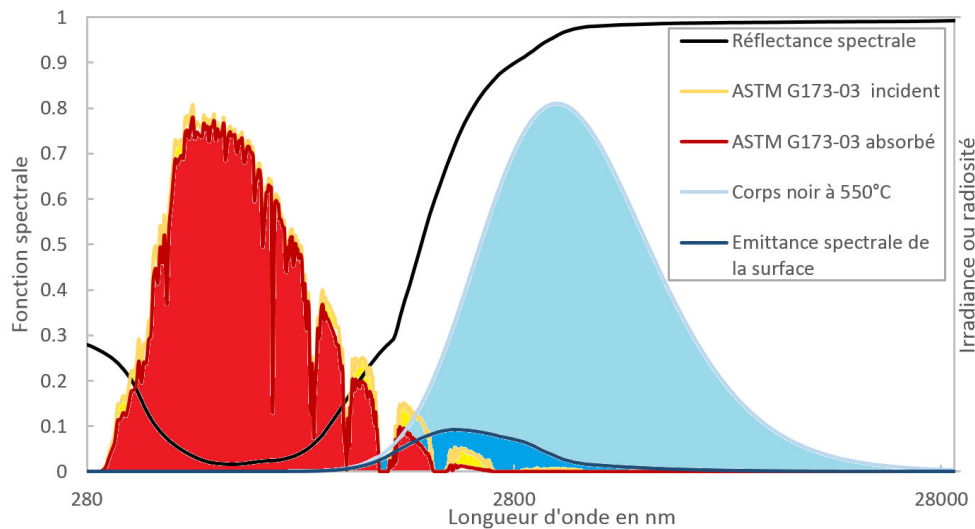


Figure 21 : Rendement héliothermique d'une surface spectralement sélective

Taux de concentration solaire moyen

Le calcul du taux de concentration (noté C) est nécessaire par exemple au calcul du rendement héliothermique. La définition rigoureuse du taux de concentration est le rapport des angles solides du Soleil en entrée (noté Ω) et en sortie (noté Ω') (Figure 22) du système concentrateur (relation (I-12)).

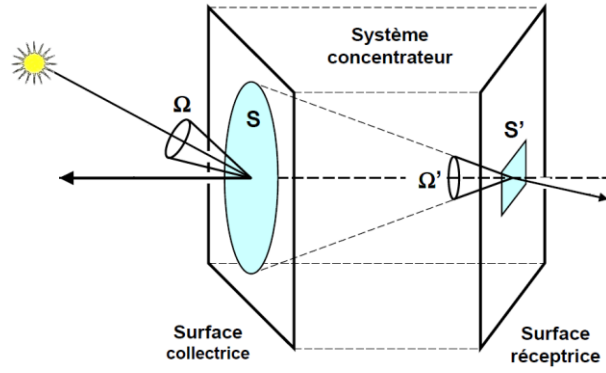


Figure 22 : Schéma du taux de concentration par un système de concentration non imageant [70]

Dans nos travaux nous le simplifions en taux de concentration moyen ; c'est-à-dire comme le rapport entre la surface collectrice du système concentrateur (S) et la surface réceptrice (S') (relation (I-12)).

$$C = \frac{\Omega'}{\Omega} \approx \frac{S}{S'} \quad (\text{I-12})$$

5.3. Propriétés optiques spectrales des matériaux

Indice de réfraction complexe

L'indice de réfraction complexe est une caractéristique optique d'un milieu physique. C'est une grandeur sans dimension, notée N . Il décrit l'interaction entre la matière et un rayonnement à une longueur d'onde λ donnée. Il permet de calculer et prédire les phénomènes de propagation des ondes à l'interface de deux milieux, tels que la réflectivité, la transmittivité et l'absorptivité spectrales définies précédemment. Il constitue donc la donnée d'entrée indispensable à un travail de simulation et d'optimisation des surfaces collectrices du rayonnement solaire. Il est décomposé en deux parties : une partie réelle n appelée communément indice de réfraction, et une partie imaginaire k appelée coefficient d'extinction (équation (I-13)). Ces deux grandeurs sont sans dimension et dépendent de la longueur d'onde λ .

$$N(\lambda) = n(\lambda) + \mathbf{i} \cdot k(\lambda) \quad (\text{I-13})$$

Le coefficient d'extinction k caractérise la perte d'amplitude d'un rayonnement électromagnétique traversant un milieu. Un matériau parfaitement transparent montre un coefficient d'extinction égal à zéro tandis qu'il sera élevé pour un matériau opaque. La capacité d'un matériau à transmettre une intensité, ou transmittance $T(\lambda)$, est fonction du coefficient d'extinction du matériau ($k(\lambda)$), de l'épaisseur de matériau traversée (d) et de la longueur d'onde incidente (λ) (équation (I-14)).

$$T(\lambda) = \exp\left(-\frac{4\pi \cdot k(\lambda) \cdot d}{\lambda}\right) \quad (\text{I-14})$$

La capacité d'un matériau à absorber la lumière est quant à elle l'absorptance notée A ou l'absorptivité notée α , définies précédemment. Cette grandeur peut se calculer grâce à la loi de conservation de l'énergie ($A = 1 - R - T$; équation (I-1)) en connaissant la transmittance et la réflectance, calculées grâce aux coefficients de Fresnel.

Coefficients de Fresnel

Les coefficients de Fresnel sont des grandeurs complexes qui permettent de décrire le phénomène de réflexion-réfraction des ondes électromagnétiques à l'interface entre deux milieux d'indices de réfraction complexes différents. Ils expriment les liens entre l'amplitude de l'onde réfléchie (E_r) ou de l'onde transmise (E_t) à l'interface, et l'amplitude de l'onde incidente (E_i) [23].

On définit le coefficient de réflexion en amplitude $r = E_r / E_i$, et le coefficient de transmission en amplitude $t = E_t / E_i$. Les coefficients de Fresnel s'écrivent différemment pour les deux types de polarisation de la lumière, s et p. La polarisation, qui impacte principalement la réflexion, est présentée de manière complète dans les annexes (§1.2, p.283). Il est ainsi possible d'établir quatre coefficients de Fresnel pour une interface et une longueur d'onde données, notés r_s , r_p , t_s et t_p . Ces coefficients s'expriment en fonction de l'angle d'incidence de la lumière et des indices de réfraction complexes spectraux des deux milieux séparés par l'interface. Pour des systèmes optiques comportant plus de deux milieux différents, par exemple un matériau massif sur lequel une ou plusieurs couches minces sont déposées, il devient nécessaire de calculer les quatre coefficients de Fresnel à chaque interface rencontrée par la lumière. Le rayon réfléchi ou transmis apparent (sortant du système optique) est alors la combinaison des rayons réfléchis ou transmis à chaque interface, et le calcul de son amplitude r ou t s'avère rapidement complexe. Plusieurs méthodes existent pour calculer les amplitudes de ces rayons apparents. Dans nos travaux, nous avons besoin d'une méthode capable de prendre en compte un grand nombre d'interfaces. En effet, si l'on souhaite modéliser un empilement de j couches minces sur un support, il est nécessaire de calculer la réflexion, la transmission et l'absorption pour $j + 1$ interfaces. Nous avons sélectionné la méthode des matrices de transfert, qui sera présentée dans le chapitre II [71], [72]. La taille de ce système matriciel est directement proportionnelle au nombre d'interfaces étudiées et permet de calculer l'amplitude du rayon réfléchi et transmis pour chaque polarisation (s et p) puis la puissance du rayon réfléchi et transmis, qui correspondent à la réflectivité ρ et à la transmittivité τ spectrales du système.

Dans le cas d'un seul matériau massif (dont l'épaisseur est très importante par rapport à la longueur d'onde) et pour une incidence normale ($\theta = 0^\circ$), les coefficients de Fresnel calculant la réflectivité spectrale ($\rho(\lambda)$) se simplifient fortement et conduisent à la formule (I-15) pour une longueur d'onde λ donnée.

$$\rho(\lambda) = |r(\lambda)|^2 = \frac{[n_2(\lambda) - n_1(\lambda)]^2 + [k_2(\lambda) - k_1(\lambda)]^2}{[n_2(\lambda) + n_1(\lambda)]^2 + [k_2(\lambda) + k_1(\lambda)]^2} \quad (\text{I-15})$$

Cette formule illustre bien que la réflectivité est liée à l'indice de réfraction complexe et non pas uniquement à l'indice de réfraction (partie réelle). Ce point est important à mettre en avant, car l'équation précédente est souvent simplifiée sans partie complexe, en supposant que le matériau est transparent ($k = 0$). À partir des coefficients de Fresnel, il est possible d'identifier les indices optiques idéaux selon la fonction optique recherchée (Table 5), et ainsi de sélectionner des matériaux adaptés qui présentent ces indices. L'équivalence entre les divers indices optiques que sont l'indice de réfraction complexe (n, k), la constante diélectrique ou permittivité complexe ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) et la conductivité électrique complexe (c_1, c_2) est rappelée en annexe (§1.3, p.284).

Table 5 : Indices optiques idéaux selon la fonction optique recherchée

		Indice de réfraction complexe		Permittivité complexe		Conductivité électrique complexe	
		n	k	ε_1	ε_2	c_1	c_2
Réflexivité	$\rho = 1$ ($\tau + \alpha = 0$)	< 1	> 1	0	0	$\gg 1$	0
Transmittivité	$\tau = 1$ ($\rho + \alpha = 0$)	1	0	1	0	0	0
Absorptivité	$\alpha = 1$ ($\rho + \tau = 0$)	1	$\gg 1$				

Les tendances suivantes sont à noter :

- Un matériau parfaitement réfléchissant doit idéalement avoir une permittivité réelle ε_1 négative tendant vers 0 et une permittivité complexe ε_2 tendant vers 0. Cela lui confère une conductivité électrique réelle importante, sans résistance (c'est-à-dire la partie complexe c_2 qui tend vers zéro). C'est donc un très bon conducteur électrique : les métaux remplissent très bien ce rôle.
- Un matériau parfaitement transparent doit avoir une permittivité réelle ε_1 tendant vers 1 et une permittivité imaginaire ε_2 tendant vers 0. Ses conductivités électriques réelles et imaginaires (c_1, c_2) tendent donc vers 0. Il s'agit de matériaux parfaitement isolants électriques (et thermiques). Des matériaux diélectriques peuvent remplir ce rôle.
- Un matériau parfaitement absorbant intrinsèquement ne peut pas exister. Pratiquement il faudrait concilier une réflectance nulle ($n = 1$ et $k = 0$) tout en absorbant la lumière ($k \neq 0$). Un matériau ayant un coefficient d'extinction k tendant vers zéro limitera la réflectance, mais il est alors nécessaire que son épaisseur augmente vers l'infini. Pratiquement un matériau composé d'une matrice céramique (isolant, donc avec un indice de réfraction n faible) et de particules métalliques (conducteur, donc avec un coefficient d'extinction important) présente un compromis avec de bonnes caractéristiques optiques, mais aussi thermiques et mécaniques (tenue des matériaux en température et conductivité thermique élevées par exemple).

N.B. Ces tendances décrites pour les différentes classes de matériaux sont majoritairement représentatives, mais ne doivent pas être érigées en règles absolues. De nombreux contre-exemples existent, comme l'ITO (Indium Tin Oxide), un oxyde à la fois transparent et conducteur [73].

5.4. Modèles d'approximation du milieu effectif (EMA)

De nombreuses solutions couches minces font appel à des matériaux de type composites [74]. Ces matériaux sont souvent considérés comme un mélange de deux milieux. Par exemple, des couches minces poreuses sont un mélange d'un matériau avec de l'air. Des cermets (céramique-métal) sont un mélange de matériaux métallique et diélectrique. Les propriétés optiques du matériau composite, résultantes de deux milieux, peuvent être obtenues par un modèle d'approximation dit des milieux effectifs (EMA en anglais). Ces modèles permettent de résoudre des cas complexes en considérant souvent le milieu composite comme parfaitement homogène. Le but est d'obtenir la constante diélectrique effective des matériaux composites (noté ϵ_{eff}), et donc l'indice de réfraction complexe effectif qui en découle, en fonction du volume occupé dans le mélange par chacun des composants. En règle générale, le composite est constitué d'inclusions de constante diélectrique ϵ_i , et d'une matrice ayant une constante diélectrique ϵ_M (Figure 23).



Figure 23 : Passage d'un cas réel d'inclusions dans une matrice (à gauche) à un milieu effectif homogène théorique (à droite)

Ces modèles EMA imposent plusieurs hypothèses :

- Le milieu effectif est isotrope et linéaire.
- Les dimensions des inclusions sont plus faibles que les valeurs des longueurs d'onde incidentes (quelques centaines de nm dans la gamme solaire), et aléatoirement disposées dans la matrice.
- Les inclusions ont une forme caractérisée par le facteur γ : par exemple on aura $\gamma = 2$ pour des inclusions sphériques (cas le plus courant) [74].

Parmi les modèles EMA existants (Lorentz-Lorentz, Maxwell-Garnett, Bruggeman par exemple), nous avons retenu le modèle de Bruggeman. La bibliographie est très riche sur ce modèle [74], [75], [76]. Il peut en effet intégrer plus de deux composants (donc plusieurs types d'inclusions) et tolère des taux d'inclusion importants sans imposer le composant majoritaire (voir chapitre V). Chaque composant est libre d'interagir avec les autres. Ce modèle est particulièrement adapté lorsque l'un des constituants est présent en grande quantité. Ainsi il est très utilisé pour décrire la rugosité entre deux milieux, le milieu effectif étant composé de 50% de chaque constituant (voir chapitre II). Le modèle de Bruggeman est décrit par l'équation (I-16) pour deux constituants de constantes diélectriques ϵ_M et ϵ_i . f est la fraction volumique du constituant i , par conséquent $(1 - f)$ est la fraction volumique du deuxième constituant m . Dans la suite de l'étude, nous considérerons des inclusions sphériques ($\gamma = 2$). ϵ_{eff} est la constante

diélectrique du composite et peut être calculée par simple résolution d'une équation du second degré qui découle de l'expression (I-16).

$$f \frac{\varepsilon_I - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon_I + 2\varepsilon_{eff}} + (1-f) \frac{\varepsilon_M - \varepsilon_{eff}}{\varepsilon_M + 2\varepsilon_{eff}} = 0 \quad (I-16)$$

VI. Conclusion du chapitre I

La voie du solaire concentré thermodynamique pour la production d'énergie thermique et électrique met à profit la ressource solaire, propre et renouvelable. Contrairement à la filière photovoltaïque, l'énergie produite a l'avantage d'être facilement stockable sous forme de chaleur, ce qui permet la production d'électricité en dehors des heures d'ensoleillement. Il existe une grande variété de technologies de collecteurs solaires à concentration, chacun composé de nombreuses interfaces assurant les différentes fonctions optiques nécessaires à leur conception, de réflexion (miroirs), transmission (vitres) ou absorption (absorbeurs thermiques). Des exemples typiques des diverses technologies existantes ont été détaillés dans ce chapitre.

Il a également été mis en avant dans ce chapitre que l'investissement initial pour construire une centrale solaire est important ($\approx 220 \text{ €/m}^2$ de champ solaire) et que les performances globales de conversion solaire-électricité limitent aujourd'hui l'implantation des technologies du solaire concentré thermodynamique à des zones géographiques à très fort ensoleillement direct (au-delà de $2000 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$). Ces deux paramètres (coût et performances) sont fortement influencés par le champ solaire. Alors que ce dernier est l'élément le plus coûteux de la centrale (environ un tiers du coût total), il est aussi le siège de la majorité des pertes optiques et thermiques, avec seulement 50% d'énergie solaire incidente valorisée en énergie thermique disponible pour le fluide caloporteur.

Des surfaces fonctionnalisées (le plus souvent par des couches minces) des différents composants constitutifs des collecteurs solaires ont été développées par l'industrie afin d'accroître les performances solaires de ces derniers. Ces performances sont équivalentes quels que soient les fournisseurs, ce qui témoigne à la fois d'une certaine maturité de la technologie, mais également de l'existence de limites techniques du fait des solutions choisies. Néanmoins, on ne retrouve des composants standardisés que pour une seule technologie de collecteurs, ceux utilisant des concentrateurs cylindro-paraboliques.

Face à ces constats, nous nous intéresserons dans les chapitres suivants à l'amélioration des rendements de conversion solaire de chaque type de surface (fonction) rencontré dans un collecteur solaire à concentration : couches minces réfléchissantes (miroirs), transparentes (vitres/antireflets) et absorbantes (absorbeurs thermiques). La recherche sur l'amélioration des performances et la réduction des coûts est un enjeu crucial, car chaque pourcent supplémentaire de puissance solaire collectée représente annuellement plusieurs centaines de MWh de puissance électrique produite en plus. Il est donc primordial de rechercher et d'identifier toutes

les voies possibles menant à une augmentation des performances solaires et/ou une réduction des coûts des composants. Pour cela nous suivrons trois axes de travail principaux :

1. Nous développerons des modélisations optiques des différents types de couches minces afin de comprendre en détail leur fonctionnement, d'étudier leurs performances limites, et de proposer des alternatives aux solutions actuelles, plus économes en matériaux rares et/ou spécifiquement adaptées à certains types de collecteurs et de conditions opératoires.
2. Nous étudierons l'impact des conditions atmosphériques locales sur les performances des collecteurs solaires. Pour cela nous évaluerons les performances solaires de chaque surface fonctionnelle en remplaçant le spectre solaire de référence classiquement utilisé par des spectres solaires modélisés issus de conditions atmosphériques locales à divers endroits caractéristiques du globe.
3. Nous évaluerons les performances de surfaces solaires pour les trois fonctions, en tenant compte de la modification du spectre solaire à chaque étape du processus de conversion, c'est-à-dire en tenant compte, dans le calcul de performances et dans l'optimisation des surfaces optiques, de celles rencontrées en amont par le rayonnement solaire.

Pour cela, les notions d'optique nécessaires pour atteindre cet objectif global ont été rappelées dans ce chapitre. Nous avons établi les expressions des performances solaires à optimiser pour les différents types de composants (réflectivité, transmittivité ou absorptivité solaires), qui découlent des propriétés optiques spectrales (fonction de la longueur d'onde) des matériaux et des surfaces. Nous avons identifié des matériaux potentiels utiles à chaque fonction : réfléchissants (métaux), transparents (diélectriques) et absorbants (mélanges composites métal-diélectrique). Nous avons également exposé les bases de théorie nécessaires au calcul du comportement optique d'un ensemble de couches minces déposées sur un substrat, à partir de leurs indices de réfraction complexes (coefficients de Fresnel), y compris dans le cas de matériaux composites (modèles d'approximation des milieux effectifs).

Dans le chapitre II, nous montrerons comment utiliser ces bases théoriques dans un programme de simulation et d'optimisation du comportement optique d'un empilement de plusieurs couches minces. Nous exposerons le principe de notre optimisation, en termes de choix des matériaux, du nombre de couches minces, de leur épaisseur et de leur composition, afin de maximiser la performance solaire. Pour cela nous passerons en revue les spécificités de notre problème, ainsi que les diverses méthodes d'optimisation possibles, avant d'en choisir une et de la détailler plus finement.

Nous avons évoqué dans ce chapitre que le spectre solaire incident est spécifique à chaque lieu d'implantation des centrales solaires alors que les stratégies d'optimisation des composants ne tiennent actuellement compte que d'un spectre standard. Ceci a un impact direct sur le calcul des performances solaires des collecteurs. Nous nous intéresserons donc également dans le prochain chapitre aux conditions locales d'implantation des collecteurs solaires, et plus particulièrement aux spectres solaires correspondants, issus des conditions atmosphériques particulières, qui seront calculés et discutés dans le chapitre III. Leur influence sur

l'optimisation des composants sera ensuite étudiée au cas par cas dans les chapitres IV à VI, pour chaque type de surface.

Dans les trois chapitres suivants (IV à VI), nous étudierons séparément chaque type de surface. Le chapitre IV sera consacré aux miroirs, le chapitre V aux vitres et le chapitre VI aux absorbeurs. Dans chaque chapitre nous introduirons le minimum de théorie nécessaire pour décrire nos études. Nous tâcherons d'exposer les solutions actuelles et d'expliquer leurs limites théoriques afin de mieux contourner ces dernières. Cela nous permettra de proposer des solutions plus performantes, plus économes en métaux rares et/ou répondant aux diverses problématiques rencontrées, notamment de vieillissement. Nous étudierons également les interactions entre les interfaces successives, pour décrire au mieux les différentes géométries de collecteurs solaires. Pour cela nous optimiserons les couches minces pour maximiser leurs performances en réponse à un spectre solaire dégradé par son interaction avec la/les couche(s) minces placées en amont. Nous réaliserons ainsi le suivi complet de l'évolution du spectre solaire sur l'ensemble des interfaces d'un collecteur solaire. Nous étudierons enfin la mise en application de ces solutions en proposant une réflexion sur l'effet des rugosités de surface et intercouche et des incertitudes sur les épaisseurs et compositions lors du dépôt des couches, inhérentes à certains procédés d'élaboration.

Pour mener à bien ces diverses études et proposer des solutions améliorant les performances optiques, il est avant tout nécessaire de développer des outils de simulation permettant :

- D'optimiser la structure des empilements de couches minces (types de matériaux, épaisseurs, compositions) répondant aux trois fonctions recherchées, afin d'adapter leur réponse spectrale vis-à-vis de divers spectres solaires, et donc les performances solaires des composants correspondants.
- D'obtenir des spectres solaires locaux, à partir des conditions atmosphériques particulières de différents sites représentatifs.

Ces outils de simulation et de calcul sont exposés en détail dans le chapitre II.

Chapitre II

Outils de modélisation et de calcul numérique

I. Introduction du chapitre II

Comme indiqué dans le chapitre I, l'augmentation des performances des centrales solaires à concentration, entraînant une baisse du prix du kWh électrique, peut s'effectuer par une meilleure conversion de la densité de flux solaire incidente en chaleur transférée au fluide caloporteur. Cela permet d'augmenter la part d'énergie disponible pour la conversion thermodynamique pour chaque mètre carré de champ solaire déployé. Cette amélioration passe par l'optimisation des rendements solaires de toutes les interfaces et surfaces employées dans les différentes technologies de collecteurs solaires présentées dans le chapitre I. Ces rendements, rapports entre la densité de flux solaire utile (transférée au fluide) et la densité de flux solaire incidente, sont calculés à partir de la fonction spectrale de la surface/interface rencontrée (miroir, surface transparente, absorbeur sélectif ou non). Les performances des collecteurs vont dépendre de la forme du spectre solaire reçu initialement (par la première surface), puis transformé par chaque surface rencontrée. L'efficacité de chaque fonction sera ainsi dépendante de la densité de flux reçue et de sa répartition spectrale, spécifique pour chaque surface. L'un des buts de cette thèse étant de montrer qu'il est possible d'adapter l'efficacité de tout type de collecteur solaire en fonction des conditions locales d'ensoleillement, il est nécessaire d'utiliser des spectres solaires locaux, c'est-à-dire des spectres solaires issus des conditions climatiques typiques d'un lieu précis de la planète, puis de visualiser leur transformation à chaque étape (fonction) dans un collecteur solaire. Pour cela il est nécessaire de disposer de deux outils, qui sont décrits en détail dans la suite de ce chapitre :

1. Un outil de modélisation des spectres solaires locaux. Pour cela, nous avons utilisé un logiciel dédié (SMARTS), ainsi qu'une base de données de conditions météorologiques (AERONET). En couplant les deux, nous obtiendrons des spectres solaires locaux pour plusieurs sites potentiels d'implantation de centrales solaires.
2. Un outil de simulation et d'optimisation des propriétés solaires d'un matériau support fonctionnalisé en surface par un empilement de couches minces. Cette étape est indispensable si l'on veut pouvoir proposer des solutions performantes qui tiennent compte de toutes les spécificités évoquées (spectres solaires locaux, nombre d'interfaces du collecteur solaire). Devant la complexité des situations étudiées, nous avons créé notre propre programme de simulation et d'optimisation des performances solaires. Après avoir dressé la carte d'identité de notre problème, nous proposerons une méthode d'optimisation adaptée puis nous détaillerons sa mise en place.

II. Outils de modélisation de spectres solaires

Le premier outil doit permettre d'obtenir des spectres solaires pour étudier et optimiser les collecteurs solaires dans les conditions locales d'implantation des centrales CSP.

2.1. Théorie des modèles atmosphériques

De nombreuses études concernant l'influence des conditions climatiques sur les performances des centrales CSP démontrent l'importance de mesures locales d'ensoleillement correspondant au site d'implantation [77]. Les conditions météorologiques sont, avec la position géographique ou le jour de l'année, les facteurs les plus déterminants pour l'irradiance (W/m^2) et la disponibilité de la ressource solaire (irradiance annuelle en $\text{kWh/m}^2/\text{an}$). Pour obtenir ces informations, des bases de données collectées sur de grandes échelles de temps sont à disposition, notamment à l'aide d'images satellites. Les quatre images ci-dessous (Figure 24) donnent une idée de la disparité des conditions climatiques sur Terre, ici représentée avec des moyennes mensuelles.

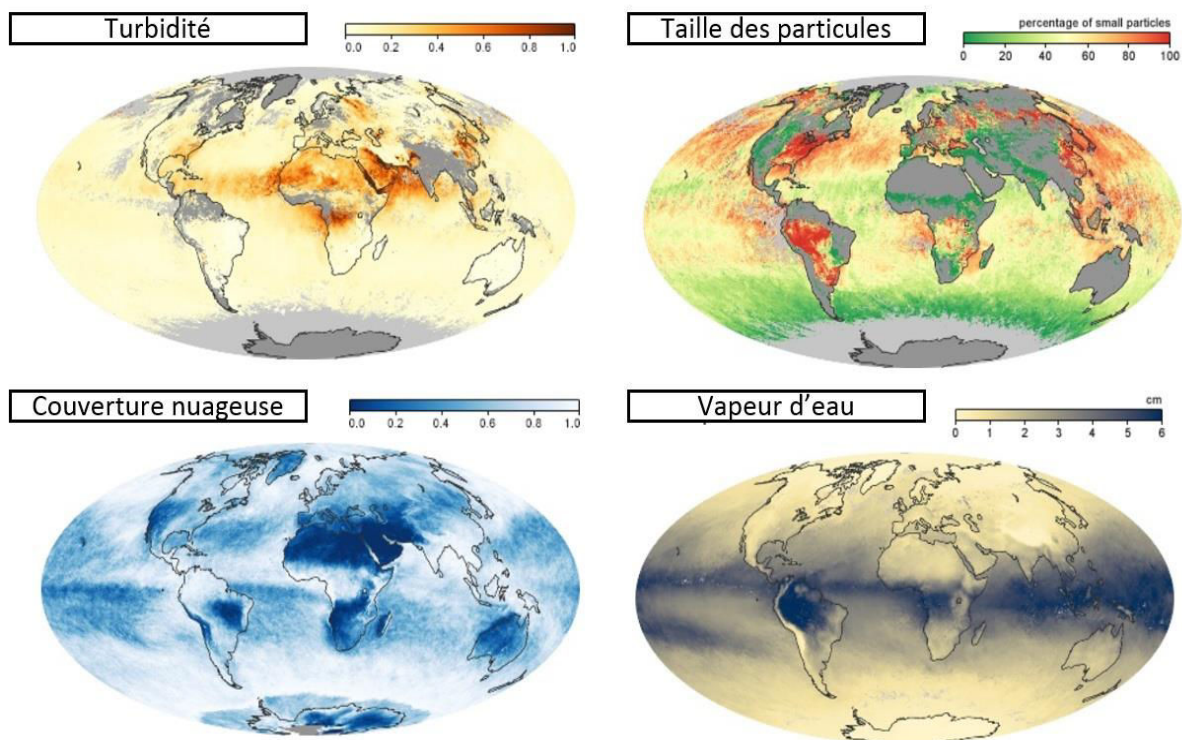


Figure 24 : Images satellites de la composition atmosphérique mondiale [78]

Si de nombreuses bases de données renseignent sur la ressource solaire annuelle ($\text{kWh/m}^2/\text{an}$), elles ne donnent en revanche aucune information sur l'irradiance spectrale ($\text{W/m}^2/\text{nm}$) correspondant au spectre solaire réellement reçu [13].

Pour cela il est donc nécessaire d'effectuer une modélisation du spectre solaire local à partir des conditions atmosphériques locales. Nous avons donc commencé par étudier les différents paramètres nécessaires à ces modélisations.

Spectre solaire extraterrestre

Pour déterminer le spectre solaire reçu au sol, il est nécessaire de partir d'un spectre solaire extraterrestre (au point d'entrée de l'atmosphère terrestre), proche d'un corps noir, duquel on retranche différentes atténuations causées par la traversée du rayonnement dans l'atmosphère

terrestre. L'atténuation totale (réflexion et absorption) varie beaucoup en fonction de la longueur d'onde considérée et donne la forme du spectre solaire reçu au sol.

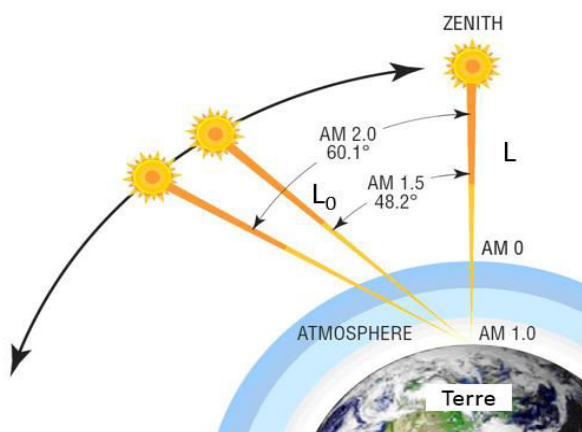
Alors que l'irradiance reçue sur Terre est extrêmement variable dans le temps et dans l'espace à cause des conditions atmosphériques, l'irradiance extraterrestre est plus constante. On observe de petites variations de l'irradiance de l'ordre de 3% soit de 1353 W/m² à 1396 W/m² selon les campagnes de mesure, les auteurs [79], [80], la distance Terre-Soleil (variable par exemple selon la saison) ou les éruptions solaires. Cependant de nombreux usages (modèle climatique, aérospatiale, énergie solaire) ont besoin d'une valeur fixe. On parle alors de « constante solaire », évaluée par moyenne à 1366,1 W/m², devenue la valeur admise mondialement [79], [81].

Facteur AM

Le facteur AM (« Air-Mass ») est un coefficient permettant de quantifier l'épaisseur de l'atmosphère traversée par le rayonnement solaire (notée L) par rapport à l'épaisseur minimale d'atmosphère (notée L_0) qu'il traverserait si le soleil était au zénith pour éclairer un site sur le plan équatorial solaire (c'est-à-dire à la normale par rapport au sol) (Figure 25).

Nous retiendrons quelques valeurs usuelles du facteur AM :

- AM 0 : correspond à une épaisseur d'atmosphère traversée nulle ($L = 0$), c'est-à-dire un spectre solaire extraterrestre, parfois approximé par un rayonnement de corps noir à 5800 K (« température » du Soleil).
- AM 1 : correspond à l'épaisseur d'atmosphère de référence sur Terre ($L = L_0$), c'est-à-dire pour un soleil au zénith sur l'équateur céleste.
- AM 1.5 : valeur de référence utilisée dans les spectres solaires standards ASTM G173-03, équivalant à un angle au zénith solaire (θ_s) de 48,2°. Cette valeur représente bien l'épaisseur moyenne annuelle d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire aux latitudes tempérées.



$$AM = \frac{L}{L_0} \approx \frac{1}{\cos(\theta_s)}$$

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_s) + a \cdot (b - \theta_s)^{-c}} \quad (II-1)$$

$$a = 0,50572$$

$$b = 96,07995$$

$$c = 1,6364$$

Figure 25 : Schéma du facteur AM et équation le liant à l'angle au zénith solaire θ_s

Le facteur AM peut être relié à l'angle au zénith solaire (angle du centre du disque solaire par rapport à la position zénithale, noté θ_s) selon l'expression (II-1). L'angle au zénith solaire

dépend de l'heure (angle solaire horaire), de la déclinaison du Soleil (qui dépend du jour de l'année) et de la latitude, comme détaillé dans les annexes du chapitre III (§3.4, p.289).

Le facteur AM ne permet qu'une estimation, car l'épaisseur de l'atmosphère n'est pas constante sur tous les points de la Terre. Pour finir, l'épaisseur et la composition des différentes couches de l'atmosphère ne sont pas uniformes [82]. On gardera donc à l'esprit que ce facteur ne permet pas à lui seul de décrire un lieu d'ensoleillement.

Turbidité atmosphérique

La turbidité permet de quantifier la transparence de l'atmosphère. Cette grandeur adimensionnelle désigne l'atténuation du rayonnement incident (selon des phénomènes d'absorption ou de diffusion) par des aérosols d'origine naturelle (spores, pollen, algues, érosion, cendres, etc.) ou artificielle (pollution, résidus de combustion). Elle dépend de la longueur d'onde.

De nombreuses expressions de la turbidité existent dans la littérature : turbidité Angström, Schüepp ou encore des visibilités atmosphériques. L'Aerosol Optical Depth (AOD) pour une longueur d'onde incidente de 500 nm est la grandeur utilisée dans les spectres solaires ASTM G173-03 [81], qui sont les spectres solaires de référence mondiale [81]. C'est donc cette grandeur que nous avons utilisée en priorité. Cette épaisseur optique, décrite par l'équation (II-2), est définie comme le logarithme du rapport entre flux incident (Φ^i) et flux transmis (Φ^t) par l'atmosphère à une longueur d'onde λ donnée, c'est-à-dire l'inverse du logarithme de la transmittance de l'atmosphère à la longueur d'onde λ [82].

$$AOD_{\lambda} = \ln \left(\frac{\Phi_{\lambda}^i}{\Phi_{\lambda}^t} \right) = -\ln(T_{\lambda}) \quad (\text{II-2})$$

Aucune expression de la turbidité ne fait intervenir de composition chimique ou de répartition de taille des particules dans les aérosols. L'influence de ces paramètres est prise en compte grâce à un modèle atmosphérique [82].

Modèle atmosphérique : distribution spectrale de la turbidité

Idéalement, il est nécessaire d'obtenir une caractérisation complète de la turbidité sur un spectre solaire complet (280 à 4000 nm). Pratiquement, de telles mesures sont rares et on dispose le plus souvent de quelques mesures réparties entre 340 nm et 1640 nm. La dépendance de la distribution de taille de particule dans un aérosol (Γ_{λ}), qui permet d'évaluer l'AOD spectralement à partir d'une seule mesure ($\Gamma_{\lambda,0}$) à une longueur d'onde connue (notée ici λ_0) est donnée par la formule (II-3).

$$\frac{\Gamma_{\lambda}}{\Gamma_{\lambda,0}} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\ddot{A}} \quad (\text{II-3})$$

Si l'exposant Angström ($\ddot{A}$) est connu, il est possible de calculer la turbidité à une longueur d'onde différente (λ) de celle où elle est connue (λ_0). Inversement, l'exposant Angström peut

être calculé si l'on dispose de plusieurs mesures de la turbidité. En pratique, pour caractériser plus précisément un spectre solaire complet, plusieurs exposants Angström peuvent être calculés sur différentes gammes de longueurs d'onde. Le spectre ASTM G173-03 en utilise deux, qui seront détaillés dans le chapitre suivant.

Absorption atmosphérique

Les composants chimiques présents dans l'atmosphère absorbent une partie importante du rayonnement solaire (loi de Beer-Lambert). C'est un phénomène sélectif qui aboutit notamment à l'absorption totale des Ultraviolets-C (100 à 280 nm) et à la forte diminution de l'intensité des UV-A et UV-B [81]. Cinq gaz sont responsables de l'essentiel de l'atténuation par absorption (Figure 26) : O₃, O₂, H₂O, CO₂ et N₂O. L'eau est le gaz le plus absorbant. Le phénomène reste très complexe à modéliser. Il est de plus nécessaire de tenir compte des températures de l'atmosphère et de la composition chimique en fonction de l'altitude, de la pression, de l'état physique des molécules dans l'aérosol, etc.

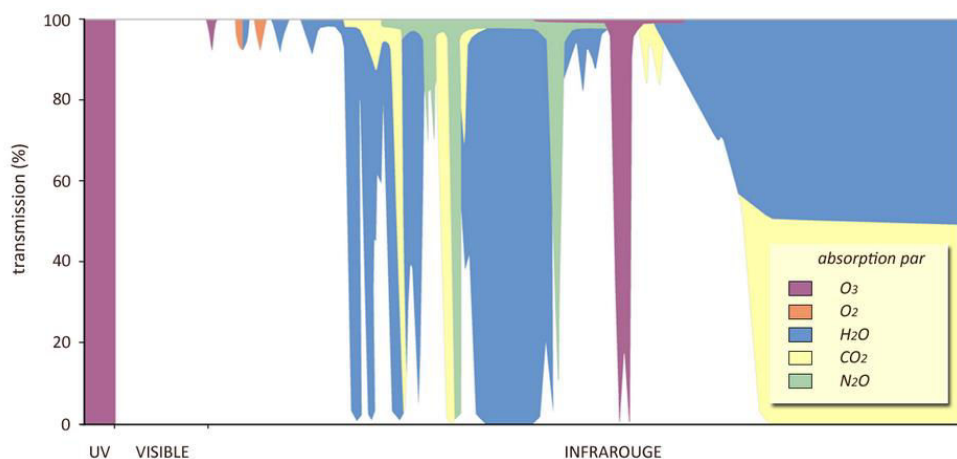


Figure 26 : Spectre en transmission illustrant l'absorption (transmission inférieure à 100%) par les cinq principaux gaz présents dans l'atmosphère terrestre [83]

Teneur en gaz de l'atmosphère

La teneur en gaz de l'atmosphère est soit exprimée en ppm (parties par million) soit en hauteur de colonne de gaz, ou mètre de colonne pour ceux qui sont plus présents comme l'ozone ou la vapeur d'eau.

Diffusions de Rayleigh et de Mie

Aux phénomènes d'absorption du rayonnement par l'atmosphère et les aérosols, peuvent s'ajouter des phénomènes de diffusion tels que ceux de Rayleigh et de Mie, qui participent également à l'extinction du rayonnement extraterrestre lorsqu'il traverse l'atmosphère (l'extinction est égale à l'absorption plus la diffusion). Ces modes de diffusion élastique (sans variation d'énergie) sont liés à la taille des particules rencontrées dans les aérosols par rapport aux longueurs d'onde du rayonnement incident. La diffusion de Rayleigh, un cas limite de la théorie de Mie, concerne les molécules gazeuses et les poussières très fines ayant des dimensions de l'ordre de λ^{-4} , où λ est la longueur d'onde de la lumière incidente [83]. C'est un phénomène sélectif : les courtes longueurs d'onde (UV) sont plus affectées que les longueurs

d'onde plus importantes (visible et infrarouge) [84]. La diffusion de Mie intervient quant à elle pour des tailles de particules plus importantes, de l'ordre de la longueur d'onde (quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres pour le rayonnement solaire) [82].

2.2. Logiciel de simulation de spectres solaires : SMARTS-2

SMARTS, pour « Simple Model of Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine », est un logiciel gratuit créé par l'équipe de C. Gueymard en 1993 [85]. Il permet de simuler rapidement le spectre solaire reçu au sol selon les conditions atmosphériques, à partir d'un spectre solaire extraterrestre (AM0) [86]. La version actuelle (2.9.5) de SMARTS permet de modéliser les deux Spectres Solaires de Référence Mondiale (SSRM) : ASTM G173-03 [79], [87]. Le premier spectre solaire exprime le rayonnement provenant directement du Soleil (Direct et Circumsolaire, DC), le second exprime le rayonnement total provenant du Soleil et des multiples réflexions et diffusions de l'environnement (Global Tilt, GT). Seul le rayonnement issu directement du disque solaire peut être concentré par des miroirs (source à l'infini). En CSP, le spectre solaire de référence est donc le spectre solaire DC.

Description fonctionnelle de SMARTS-2

Pour effectuer la modélisation, SMARTS-2 découpe le spectre solaire en 1881 longueurs d'onde réparties entre 280 et 4000 nm [86]. Le pas de discrétisation est variable en fonction de la zone du spectre (0,5 nm, 1 nm ou 5 nm) afin d'avoir un compromis entre la précision et le temps de calcul. Le logiciel initie tout d'abord sa modélisation par un spectre solaire extraterrestre choisi par l'utilisateur. Il est ensuite nécessaire de décrire le site qui reçoit le rayonnement solaire : altitude et/ou pression atmosphérique, coordonnées géographiques (latitude et longitude), etc. L'atmosphère peut quant à elle être choisie parmi 10 atmosphères de référence ou définie manuellement par l'utilisateur. Pour cela, on fixe par exemple la saison, les températures au sol, le taux de vapeur d'eau (H₂O), de dioxyde de carbone (CO₂), d'ozone (O₃) ou le degré de pollution. Un modèle d'aérosols, sélectionné parmi 11 disponibles ou calculé à partir des coefficients Angström, permet de plus de déterminer la répartition spectrale de la turbidité (transparence de l'atmosphère). Pour finir, l'épaisseur de l'atmosphère traversée est calculée grâce à la position du soleil (angle au zénith solaire) ou directement grâce au facteur Air Mass.

Utilisation de SMARTS-2

Pratiquement, la version 2.9.5 de SMARTS-2 est un ensemble de macros Visual Basic Application (VBA) fonctionnant sous le logiciel Excel (de Microsoft® Office). Chaque paramètre nécessaire à la modélisation du spectre solaire doit être renseigné manuellement en naviguant dans une interface graphique. Après calcul, le résultat final est présenté dans un fichier texte et peut être exprimé parmi 45 grandeurs de sortie différentes. On y retrouve par exemple de nombreux types d'irradiance spectrale, telles que l'irradiance spectrale globale (GT) et l'irradiance spectrale Directe et Circumsolaire (DC), toutes les deux exprimées en W/m²nm⁻¹ reçus au sol [86]. Pour les applications en solaire thermique concentré, nous utilisons exclusivement l'irradiance spectrale Directe et Circumsolaire.

Pour modéliser un spectre solaire avec le logiciel SMARTS-2, il faut rentrer manuellement chaque paramètre d'entrée, lancer manuellement le programme et recueillir les données en sortie. Pour cette raison, nous modéliserons un nombre limité de spectres solaires.

2.3. Bilan sur le filtre atmosphérique

Au total, de nombreux phénomènes atténuent le spectre solaire extraterrestre (AM0) illustré en rouge dans la Figure 27. A titre d'exemple, dans les conditions standards retenues pour modéliser le spectre solaire de référence ASTM G173-03 DC (AM1.5, liste complète dans les annexes du chapitre III, §3.1, p.287), la transmittance spectrale de l'atmosphère est illustrée par la courbe noire de la Figure 27, soit une transmittance solaire de 66% du spectre solaire extraterrestre [86]. Ceci conduit à une densité de flux DC transmis au sol d'environ 900 W/m^2 , à partir du spectre extraterrestre AM0 choisi ($1366,1 \text{ W/m}^2$, voir chapitre III).

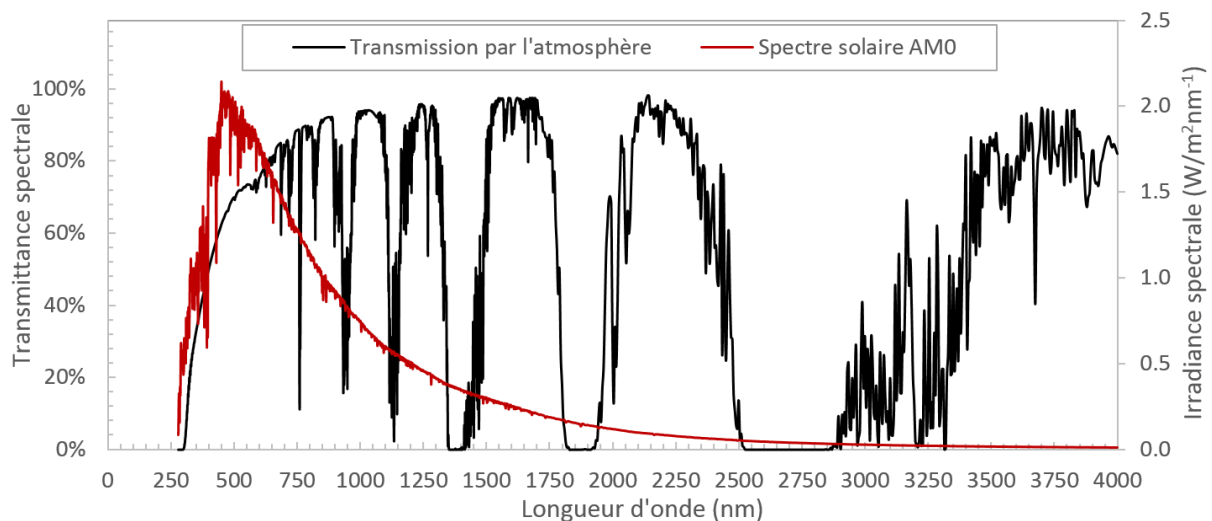


Figure 27 : Transmittance d'un spectre solaire AM0 à un spectre ASTM G173-03 DC

III. Simulation et optimisation numériques de couches minces

Pour assurer la conversion de l'irradiance des spectres solaires modélisés en énergie thermique par un collecteur solaire, il est nécessaire d'obtenir les meilleurs rendements solaires possibles. Les couches minces donnant une fonction optique (réflexion, transmission ou absorption solaire) aux diverses surfaces du collecteur constituent le levier principal : chacune d'elles doit être modélisée puis optimisée pour maximiser à convenance la propriété solaire recherchée. C'est pourquoi un outil de simulation et d'optimisation d'empilements de couches minces a été spécifiquement développé dans ce travail.

3.1. Modélisation des propriétés optiques d'empilements de couches minces

La modélisation des propriétés optiques (réflectance, transmittance et absorptance) d'un empilement d'une ou plusieurs couches minces sur un support (substrat) placé dans un milieu ambiant est possible grâce aux calculs des coefficients de Fresnel en utilisant les indices de réfraction complexes de chaque matériau (voir chapitre I, §5.3, p.55). Pour résoudre ces calculs, nous avons opté pour une méthode de matrices de transfert [71], [72]. Cette méthode est régulièrement citée dans la bibliographie [88], [89], [90]. Son avantage essentiel est qu'elle est applicable à des empilements d'un grand nombre de couches minces superposées.

Méthode des matrices de transfert

La propagation d'une onde lumineuse monochromatique à travers un système de plusieurs interfaces peut être calculée par la méthode des matrices de transfert [71], [72]. Le système est constitué d'un assemblage multicouche de matériaux différents, parallèles entre eux, homogènes et d'épaisseur fixe, comme illustré par la Figure 28. Le but de la méthode est de déterminer l'amplitude des ondes réfléchi et transmise à chaque interface grâce à des matrices pour déterminer ensuite la réflectance (R) et la transmittance (T) de l'ensemble substrat et couches minces. On déduit l'absorptance par la loi de conservation de l'énergie ($A = 1 - R - T$). Le calcul est répété pour chaque longueur d'onde afin de tracer une fonction spectrale $R(\lambda)$, $T(\lambda)$ ou $A(\lambda)$ qui pourra ensuite être utilisée pour extraire les propriétés solaires (voir chapitre I, §5.2, p.50).

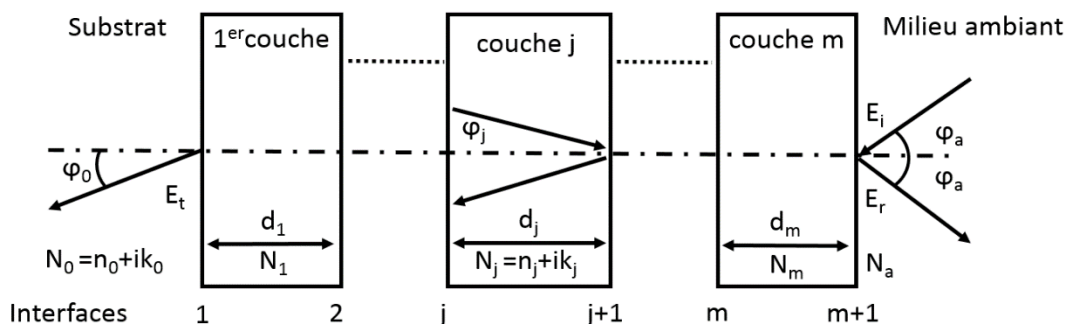


Figure 28 : Système multicouche sur un substrat

Le système multicouches illustré sur la Figure 28 est un empilement de m couches minces constituées chacune d'un matériau d'indice de réfraction complexe N_j ($N_j = n_j + i k_j$), d'une épaisseur d_j de l'ordre de la longueur d'onde incidente (quelques dizaines à centaines de nanomètres). Ce système est placé entre deux milieux semi-infinis, le substrat (d'indice N_0) et le milieu ambiant (d'indice N_a), tous deux d'une épaisseur très importante par rapport à la longueur d'onde incidente, de l'ordre du millimètre pour le substrat, le milieu ambiant ayant une épaisseur infinie. Au sein d'un tel système, chaque rayon est réfléchi un nombre important de fois aux diverses interfaces. A partir de l'angle d'incidence du rayonnement incident (φ_a), la loi de Snell-Descartes (équation (II-4)) permet de déterminer l'angle d'incidence φ_j de l'onde lumineuse sur chaque interface qu'elle rencontre, en suivant son parcours dans l'empilement, depuis le milieu ambiant vers le substrat (de droite à gauche sur la Figure 28).

$$N_0 \sin \varphi_0 = N_j \sin \varphi_j = \dots = N_m \sin \varphi_m = N_a \sin \varphi_a \quad (\text{II-4})$$

Une fois l'angle d'incidence calculé nous déterminons, pour chaque interface j , les amplitudes relatives de l'onde selon les deux polarisations (q^s et q^p), puis la différence de phase θ_j , qui dépendent de l'indice de réfraction de la couche N_j , de son épaisseur d_j et de la longueur d'onde λ (équation (II-5)).

$$q_j^s = N_j \cos \varphi_j \quad q_j^p = N_j / \cos \varphi_j \quad \theta_j = \frac{2\pi}{\lambda} d_j N_j \cos \varphi_j \quad (\text{II-5})$$

Il est ainsi possible de déterminer, pour chaque polarisation (s et p), une matrice caractéristique 2×2 par couche mince j . Ces deux matrices, M_j^s et M_j^p , sont données par l'équation (II-6).

$$M_j^{s,p} = \begin{pmatrix} \cos \theta_j & -\frac{i}{q_j^{s,p}} \sin \theta_j \\ -i q_j^{s,p} \sin \theta_j & \cos \theta_j \end{pmatrix} \quad (\text{II-6})$$

Il est nécessaire de créer autant de matrices qu'il y a de couches minces dans l'empilement (de 1 à m selon la Figure 28). Les matrices caractéristiques étant issues des amplitudes relatives (équation (II-5)), elles sont composées de nombres complexes. Ces matrices déterminent à la fois les phénomènes de réflexion (déterminés par les deux parties de l'indice de réfraction complexe) et les phénomènes de transmission et d'absorption (déterminés par le coefficient d'extinction, soit la partie imaginaire de l'indice de réfraction complexe).

Pour un système multicouche, lorsque les matrices caractéristiques de toutes les couches sont calculées, on multiplie ces matrices dans l'ordre de progression de l'onde dans le système (de la couche externe m vers la couche 1, la plus proche du substrat), en respectant leur polarisation (s ou p), selon l'équation (II-7).

$$M = \prod_{j=1}^m M_j = M_m M_{m-1} \dots M_1 = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} (s, p) \quad (\text{II-7})$$

Chaque matrice M^s et M^p contient toute l'information décrivant le comportement de l'onde lumineuse incidente sur son trajet complet selon la polarisation s ou p . Afin de calculer les coefficients de Fresnel en réflexion et en transmission pour l'ensemble substrat-empilement selon chaque polarisation, nous utilisons les équations (II-8) et (II-9), basées sur les éléments des matrices M^s et M^p de l'équation (II-7). Les valeurs d'amplitude relative pour chaque polarisation (q^s et q^p) sont issues de l'équation (II-5).

Coefficients de Fresnel en réflexion en amplitude :

$$r = \frac{q_a m_{11} - q_0 m_{22} + q_a q_0 m_{12} - m_{21}}{q_a m_{11} + q_0 m_{22} + q_a q_0 m_{12} + m_{21}} (s, p) \quad (\text{II-8})$$

Coefficients de Fresnel en transmission en amplitude :

$$t = \frac{2 \cdot q_a}{q_a m_{11} + q_0 m_{22} + q_a q_0 m_{12} + m_{21}}(s, p) \quad (\text{II-9})$$

La réflectance, la transmittance ainsi que l'absorptance sont calculées à partir de ces valeurs d'amplitude relative.

Calcul de la réflectance, de la transmittance et de l'absorptance

Le calcul de la puissance réfléchi à partir des coefficients de Fresnel en réflexion pour les deux polarisations (équation (II-8)) est donné par l'équation (II-10), avec $\mathbb{R}$ la partie réelle d'un nombre complexe et $\mathbb{Z}$ sa partie imaginaire.

$$R^s = |r^s|^2 = \mathbb{R}(r^s)^2 + \mathbb{Z}(r^s)^2 \quad R^p = |r^p|^2 = \mathbb{R}(r^p)^2 + \mathbb{Z}(r^p)^2 \quad (\text{II-10})$$

La réflectance R pour une lumière incidente non polarisée telle que le rayonnement solaire est enfin donnée par l'équation (II-11).

$$R = \frac{R^s + R^p}{2} \quad (\text{II-11})$$

Le calcul de la transmittance globale du système substrat et couches minces demande quant à lui deux étapes de calcul distinctes, à savoir la transmittance dans l'empilement de couches minces puis dans le substrat. En effet, les coefficients de Fresnel en transmission calculés en amont (équation (II-9)) ne permettent de déterminer que la transmittance des ondes lumineuses par l'ensemble des couches minces (notée T_{cm}) grâce à l'équation (II-12). La transmittance du substrat n'est pas prise en compte.

$$T_{cm}^s = \frac{\mathbb{R}(q_0^s)}{\mathbb{R}(q_a^s)} \cdot [\mathbb{R}(t^s)^2 + \mathbb{Z}(t^s)^2] (s, p) \quad T_{cm}^p = \frac{\mathbb{R}(q_0^p)}{\mathbb{R}(q_a^p)} \cdot [\mathbb{R}(t^p)^2 + \mathbb{Z}(t^p)^2] \quad (\text{II-12})$$

Le calcul de la transmittance de l'onde par le substrat, notée T_{sub} , s'effectue grâce à l'équation (I-14) du chapitre I. Ce calcul tient compte de l'épaisseur du substrat (notée d_s), de son coefficient d'extinction k_s et de la longueur d'onde incidente λ . La transmittance globale T à la longueur d'onde λ par le système substrat-couches minces, pour une lumière incidente non polarisée, est donnée par l'équation (II-13).

$$T = T_{cm} \cdot T_{sub} = \frac{T_{cm}^s + T_{cm}^p}{2} \cdot \exp\left(-4\pi \cdot k_s(\lambda) \cdot \frac{d_s}{\lambda}\right) \quad (\text{II-13})$$

Enfin, la loi de conservation de l'énergie permet de déterminer l'absorptance ($A = 1 - R - T$). Notons que par souci de lisibilité, nous n'avons pas écrit dans les équations en amont l'ensemble des paramètres ($\lambda, T_e, \psi, \theta$) dont dépendent pourtant la réflectance et la transmittance totales. En particulier, tous ces calculs doivent être effectués *pour chaque longueur d'onde* du rayonnement incident, ce qui augmente fortement le temps de calcul.

3.2. Optimisation des performances optiques d'empilements de couches minces

Analyse du problème d'optimisation

Nous avons besoin d'un outil informatique capable d'optimiser un empilement de plusieurs couches minces déposé sur un substrat, afin d'optimiser selon la fonction recherchée, la réflectance solaire, la transmittance solaire, l'absorptance solaire ou le rendement héliothermique. Ces performances dépendent des matériaux en couches minces utilisés (donc de leurs indices de réfraction complexes en fonction de la longueur d'onde) et de leurs épaisseurs respectives. Il est également nécessaire de ne pas exclure des paramètres propres aux couches minces : rugosité de surface, incertitude d'épaisseur expérimentale, etc. Ainsi de nombreuses variables peuvent être influentes :

- Le type de spectre solaire reçu, avec une possible altération par exemple par d'autres surfaces (miroir(s), vitre(s), etc.) en amont de l'interface étudiée : 1 à 2 variable(s).
- L'étendue du domaine spectral étudié : 1 variable.
- Le matériau du substrat sur lequel est déposé le système multicouche : 1 variable.
- Pour chaque couche mince, nous considérons un matériau à travers son indice de réfraction complexe et son épaisseur. De plus, dans le cas de composites approximatés par la méthode EMA (voir chapitre I, §5.4, p.58), un second matériau est inclus dans un premier avec une certaine fraction volumique : 2 à 4 variables par couche mince déposée.
- Les condition(s) d'utilisation de l'empilement de couches minces : l'angle d'incidence du rayonnement (1 variable) ; dans le cas d'une optimisation du rendement héliothermique de conversion, la température et la forme de l'absorbeur, la température ambiante, le taux de concentration solaire et le rendement optique du concentrateur (5 variables supplémentaires).

Nous nous trouvons face à un problème d'optimisation complexe. Un cas simple (une seule couche mince) comprendra déjà 6 variables, tandis qu'un cas plus complexe (par exemple, 4 couches minces) en comprendra plus de 20. Il est donc impératif de disposer d'un algorithme pouvant résoudre des problèmes complexes.

Choix de l'algorithme d'optimisation

Notre problème est la recherche de l'optimum d'une fonction à plusieurs variables décrivant le comportement d'un empilement de couches minces déposées sur un substrat dans un milieu ambiant. La fonction à optimiser est appelée fonction coût et toutes les valeurs possibles de chaque variable du problème sont incluses dans des ensembles admissibles choisis par l'utilisateur. Nous recherchons parmi ces ensembles admissibles les valeurs qui maximisent la fonction coût. Lorsque le problème est optimisé, l'ensemble des variables devient fixe : ce sont les valeurs qui répondent le mieux au problème. Pour choisir un type d'algorithme d'optimisation adapté à notre étude, nous avons dressé la carte d'identité de notre problème.

1. Nous avons quatre fonctions coût : la réflectance solaire (miroirs), la transmittance solaire (vitres), l'absorptance solaire (absorbeurs) et le rendement héliothermique (absorbeurs sélectifs).
2. Ces fonctions coût ne sont pas explicites : il n'existe pas d'écriture telle que $y = f(x)$ où y est une propriété solaire et x l'ensemble des variables de notre problème. Les propriétés solaires sont explicites à partir des fonctions spectrales correspondantes (réflectance, transmittance ou absorptance spectrales). Mais ces fonctions spectrales sont elles-mêmes implicites (coefficients de Fresnel et matrice de transfert).
3. Les fonctions coût ne sont pas dérivables.
4. Les fonctions coût sont continues. Des variations infinitésimales de x entraînent des variations infinitésimales de $f(x)$.
5. Les fonctions coût sont monoobjectif. Nous recherchons un seul jeu de variables maximisant une seule fonction.
6. Les variables ont toutes une représentation physique réelle. Leurs états initiaux sont donc relativement limités. Par exemple, on ne rencontre pas d'épaisseur de couche mince négative.

Les points 2 et 3 nous privent à eux seuls de nombreuses méthodes d'optimisation dites exactes telles que les méthodes des zéros du gradient, par encadrement, les méthodes de Newton-Raphson, méthodes des recuits ou la méthode des sécantes [91]. De même, les optimisations de type polynomiales ne peuvent pas être utilisées (Gloptipoly [92]). Il est donc nécessaire d'utiliser des méthodes approchées [93]. Le nombre important de variables nous pousse vers des méthodes stochastiques telles que les méthodes de recuit simulé, les algorithmes évolutionnaires ou l'intelligence en essaim [93]. Nous avons choisi d'utiliser un algorithme d'optimisation stochastique inspiré des algorithmes génétiques [94]. Un algorithme génétique est un programme informatique évolutionniste inspiré de la sélection naturelle et de la théorie de l'évolution, créé en 1975 par J.H. Holland [95]. Cette méthode stochastique permet d'obtenir une solution approchée d'un problème physique complexe.

Avantages et inconvénients des algorithmes stochastiques

L'avantage principal des algorithmes stochastiques est la rapidité de calcul associée. Cet algorithme est très facilement parallélisable (calcul en parallèle sur plusieurs processeurs). Le temps de calcul dépend essentiellement de la complexité de la fonction coût choisie : son calcul représente 95 à 99% du temps de calcul global dans notre cas.

L'inconvénient majeur des algorithmes stochastiques et notamment des algorithmes génétiques est qu'ils sont sensibles aux extrema locaux. En effet, un algorithme génétique permettra toujours d'atteindre un minimum ou un maximum de la fonction coût (sauf si cette dernière est instable ou indépendante des variables) mais sans garantie que l'extremum soit global, c'est-à-dire qu'il soit le meilleur extremum atteignable pour le problème considéré. L'algorithme peut identifier un extremum qui n'est que local, ou l'extremum global peut ne pas être compris dans l'ensemble admissible choisi lors de l'initialisation. C'est pour cette raison que nous avons créé notre propre algorithme d'optimisation inspiré des algorithmes génétiques.

3.2.1.Principe de l'algorithme d'optimisation

L'algorithme d'optimisation est basé sur les étapes suivantes. Sommairement, l'algorithme procède à une réduction progressive de l'ensemble admissible des variables afin de créer un ensemble admissible ponctuel qui maximise la fonction coût. Quatre étapes principales sont suivies.

1. Génération d'une population d'individus

Un individu est composé d'un ensemble de variables et de paramètres tels que décrits plus haut. Les paramètres sont des grandeurs, prises parmi les variables, qui sont fixées lors de l'optimisation. Ces paramètres ont une influence directe sur la fonction coût considérée. Ils sont renseignés lors de l'initialisation. Par exemple, il peut s'agir de la température de fonctionnement, du taux de concentration solaire, etc.

On génère aléatoirement une population de l'ordre de 25 à 100 individus, tous différents. Pour cela, chaque variable du problème est tirée au sort à l'aide d'un nombre pseudo-aléatoire parmi son ensemble admissible, puis affectée à un individu. Il peut s'agir par exemple de l'épaisseur d'une couche mince choisie dans un ensemble admissible [0 ; 200 nm].

L'utilisation de nombres pseudo-aléatoires pour générer chaque individu est courante [95], [96]. Il est nécessaire d'utiliser un générateur de qualité, pour s'assurer que la population est uniformément répartie et qu'aucune série répétitive n'apparaît. Nous avons utilisé dans nos travaux la fonction « grand » de Scilab [97] basée sur la méthode de Mersenne-Twister qui génère des nombres pseudo-aléatoires avec une période $2^{19937} - 1$ [98].

2. Évaluation des individus

La fonction coût (performance solaire) de chaque individu est calculée. Un algorithme de tri rapide permet ensuite de lister les individus selon leur performance, dans l'ordre décroissant. Nous évaluons tous les individus de toutes les générations confondues. Notons que le nombre d'individus croît au fur et à mesure des itérations. Nous n'avons cependant pas relevé de problème de temps de calcul étant donné que l'algorithme converge « rapidement » (20 à 30 itérations en moyenne, soit de l'ordre du millier d'individus au total) et que l'algorithme de tri rapide utilisé est très performant.

3. Sélection des individus

Les individus sont sélectionnés en fonction de leur position dans la liste d'évaluation créée. Les meilleurs individus sont sélectionnés selon un taux de sélection exprimé en %, par exemple 25% ou 30%. Ce pourcentage est à rapporter au nombre d'individus généré par itération et non pas au nombre total d'individus. Par exemple un taux de sélection de 30%, pour une génération de 100 individus par itération, signifie que 30 individus sont sélectionnés à chaque itération dans la population totale. Le nombre d'individus sélectionné reste donc identique pour toutes les itérations. En effet, sélectionner un pourcentage de la population totale, qui croît au fur et à

mesure des itérations, ne permet pas de converger efficacement, car le nombre d'individus sélectionnés augmenterait au fur et à mesure des itérations.

4. Réduction de l'ensemble admissible

Dans un algorithme génétique, cette étape serait celle de la reproduction. Ici, à la place d'utiliser les « gènes » (les variables de chaque individu) de la génération précédente pour créer une nouvelle génération, nous avons préféré réduire au fur et à mesure l'ensemble admissible de chaque variable en conservant celui des meilleurs individus. L'ensemble admissible initial de chaque variable (épaisseurs, fraction volumique, etc.) est alors remplacé par celui correspondant aux individus sélectionnés (plus restreint). Ainsi la prochaine génération ne sera pas directement issue des individus de la génération précédente, mais de nouveaux individus seront générés aléatoirement (étape 1) à partir des ensembles admissibles des meilleurs individus de la génération précédente.

Itération

Une itération est un bloc de calcul comprenant les quatre étapes ci-dessus : génération d'une population, évaluation, sélection et réduction du domaine admissible pour la génération suivante. D'itération en itération, l'ensemble admissible de chaque variable qui donne naissance aux individus de chaque itération/génération devient progressivement de plus en plus réduit [99]. Parallèlement, les individus générés sont de plus en plus performants, au regard de la fonction coût étudiée. Le nombre total d'individus augmente linéairement à chaque itération, car chaque itération ajoute son lot d'individus à la population totale lors de l'étape de génération et les individus non sélectionnés ne sont pas éliminés.

La Figure 29 illustre, à titre d'exemple, trois itérations d'un problème à deux variables. Cet exemple traite de la maximisation de la transmittance solaire d'une couche antireflet SiO_2 poreuse, que l'on rencontrera dans le chapitre V. Les variables sont l'épaisseur et la porosité de la couche. Les carrés représentent les ensembles admissibles, les points les individus générés, à chaque itération (symbolisée par une couleur différente). 50 individus sont générés à chaque itération et le taux de sélection est de 30%, ce qui représente 15 individus sélectionnés dans la population totale à chaque itération. Lors de la première itération (en bleu), 50 individus (points bleus) sont générés dans un ensemble admissible très large (carré bleu) (épaisseur entre 0 et 200 nm, porosité entre 0 et 100%) afin d'envisager toutes les possibilités. Les 15 meilleurs individus de la première itération sont sélectionnés pour générer l'ensemble admissible réduit de la seconde itération (carré orange entourant les 15 meilleurs points bleus). Lors de la seconde itération (en orange), 50 nouveaux individus sont générés aléatoirement (points orange) dans ce nouvel ensemble admissible (carré orange), puis les 15 meilleurs individus (parmi les points bleus et orange à l'intérieur du carré orange) sont ensuite sélectionnés pour générer l'ensemble admissible réduit de l'itération suivante (carré gris). Lors de la troisième itération (en gris), on génère à nouveau 50 individus (points gris), puis l'on sélectionne les 15 meilleurs parmi les points bleus, orange et gris compris dans le carré gris, et ainsi de suite. On se rapproche ainsi de la solution (125 nm, 50% de porosité) grâce à la réduction de l'ensemble admissible par sélection des meilleurs individus des itérations précédentes.

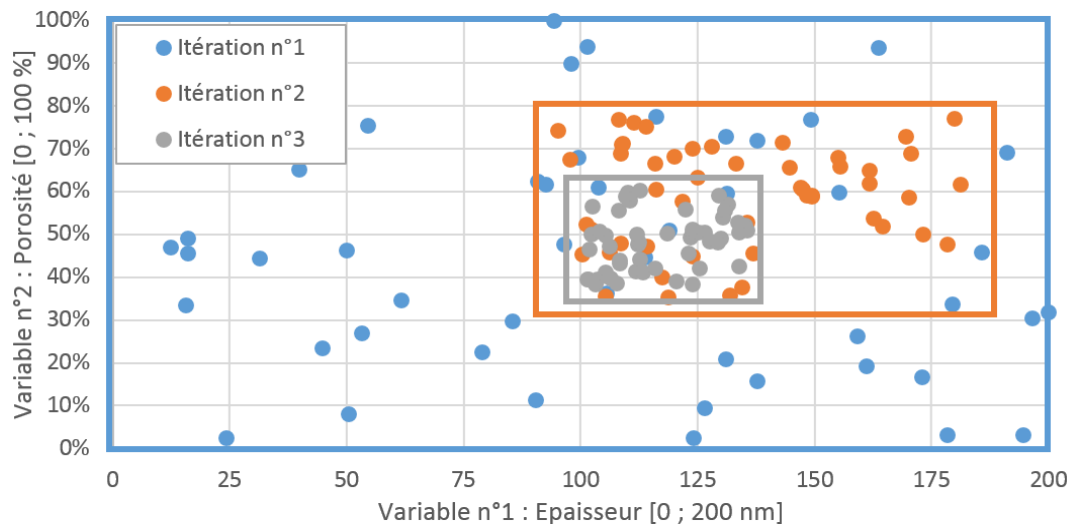


Figure 29 : Illustration de trois itérations lors de l'optimisation d'un problème à deux variables avec 50 individus ajoutés par génération et sélection des 15 meilleurs de la population totale à chaque itération

Convergence

La succession d'itérations permet finalement au programme de converger pour fournir une solution optimisée. L'algorithme s'arrête lorsque tous les individus d'une génération répondent au critère d'arrêt choisi, défini ci-dessous, ou lorsque leur performance ne connaît plus d'évolution majeure [93], [100].

L'algorithme peut fonctionner indéfiniment pour diminuer l'ensemble admissible et ainsi fournir un résultat avec un écart infinitésimal par rapport à l'optimum. Il convient donc de déterminer un critère d'arrêt assurant une convergence satisfaisante tout en conservant un temps de calcul raisonnable. De nombreux critères existent, nous en avons codé trois :

- Arrêt manuel. L'utilisateur fixe lui-même un nombre limité d'itérations, fixant ainsi le temps de calcul. Une bonne connaissance du problème est dans ce cas nécessaire. La solution peut être approximative si le nombre d'itérations s'est révélé insuffisant par rapport à la difficulté du problème.
- Arrêt automatique sur les variables. L'utilisateur fixe une convergence à atteindre sur les variables. Le programme augmente le nombre d'itérations pour atteindre cette limite sur chaque variable. Une valeur satisfaisante est de l'ordre de 0,1 nm pour les épaisseurs et de 0,1% pour les fractions volumiques des couches minces de l'empilement. Cette méthode permet d'obtenir une solution ayant un sens pratique.
- Arrêt automatique sur la fonction coût. L'utilisateur fixe une convergence à atteindre sur la fonction coût. Le programme augmente le nombre d'itérations jusqu'à atteindre cette limite. L'ensemble admissible de chaque variable sera fonction de la sensibilité de la fonction coût à cette variable. Cette méthode permet à la fois d'obtenir une solution optimale et une analyse de sensibilité à chaque variable.

Nous utilisons préférentiellement les arrêts automatiques, plus pertinents pour notre étude.

3.2.2. Paramétrage et initialisation de l'algorithme d'optimisation

Initialisation de l'algorithme d'optimisation

L'initialisation de l'algorithme est une étape clef. L'utilisateur renseigne les paramètres (fixes) nécessaires et définit l'ensemble admissible de chaque variable. Une étude de la bibliographie ou quelques lancements préliminaires permettent rapidement d'avoir un ordre de grandeur des ensembles admissibles à appliquer.

Paramétrage de l'algorithme d'optimisation

Le paramétrage principal d'un algorithme consiste à choisir le nombre d'individus créés par itération, leurs taux de sélection et éventuellement le nombre d'itérations. Pour identifier le paramétrage le plus adapté, nous étudions le nombre total d'individus nécessaires à l'obtention d'une solution [93]. Nous avons trois contraintes à respecter :

1. Une contrainte de convergence : le but est de s'assurer que l'écart-type des fonctions coût des individus de la dernière génération est aussi faible que possible. Dans ce cas le programme a bien identifié une solution : l'ensemble admissible est tellement réduit que tous les individus de la dernière génération peuvent être considérés comme optimum.
2. Une contrainte de fidélité : le but est de s'assurer que l'algorithme retrouve à chaque fois la même solution, indépendamment de l'initialisation de l'ensemble admissible.
3. Une contrainte de justesse, qui permet de juger de la validité du résultat. Le but est de s'assurer que la solution identifiée est aussi globale que possible. Idéalement, nous comparons la solution identifiée à une solution présente dans la bibliographie. Sinon nous comparons la solution aux meilleurs résultats obtenus avec différentes initialisations. Cette valeur peut alors être supposée comme étant l'extremum global.

Dans la pratique, nous n'avons pas trouvé, sauf exception, de solution optimisée pour des empilements de couches minces solaires dans la bibliographie [89]. Il est donc difficile d'estimer réellement la justesse et donc la précision. Pour identifier un paramétrage adéquat à un type de problème, nous procédons en cinq étapes chronologiques :

1. Nous identifions un problème à résoudre dont la réponse est au moins connue partiellement. Cela nous permet d'initialiser l'algorithme en étudiant différents paramétrages.
2. Nous prospectons si la contrainte de convergence est respectée en étudiant l'écart-type de la fonction coût lors de la dernière itération. Nous écartons les paramétrages les moins convergents, c'est-à-dire ceux qui n'ont que peu réduit l'ensemble admissible du problème (par exemple, dont l'écart-type est supérieur à 10^{-5} pour 20 itérations).
3. Nous relançons un nombre important de fois (> 25 fois) le même paramétrage avec une initialisation différente de l'ensemble admissible pour évaluer la fidélité, c'est-à-dire la reproductibilité des résultats.
4. Nous comparons l'ensemble des solutions obtenues. Les paramétrages présentant une seule solution avec un écart important par rapport à la meilleure solution sont écartés.
5. Les paramétrages restants sont triés en fonction du nombre total d'individus nécessaire pour respecter les trois contraintes (convergence, fidélité, justesse). Le paramétrage qui permet le calcul de l'optimum le plus rapide est conservé.

De manière générale, il s'agit d'un compromis. Nous observons que des nombres d'individus trop faibles et/ou des taux de sélection trop stricts conduisent l'algorithme à converger trop rapidement vers un extremum, avec le risque que celui-ci soit local. Le critère de fidélité n'est alors pas respecté, la diversité des individus étant très rapidement insuffisante. Il est donc nécessaire d'étudier la complexité du problème et d'avoir une idée du risque d'extremum local avant de choisir un paramétrage.

Complexité des problèmes d'optimisation : paramétrage type

Dans ces travaux, nous avons rencontré trois niveaux de complexité demandant trois paramétrages différents. Si un paramétrage est adapté pour un problème complexe, il l'est également pour un problème simple. Cependant l'inverse n'est pas vrai et l'utilisation d'un paramétrage simple conduit souvent à des solutions convergentes, mais non justes et non fidèles. Par conséquent dans le cas d'un problème de complexité inconnue, il est préférable d'opter pour un paramétrage particulier lors de la toute première résolution, avec un critère d'arrêt manuel (nombre d'itérations fixé). Cela permettra, pour une première approche, d'évaluer la difficulté du problème et la sensibilité à chaque variable. La Table 6 indique le paramétrage type de l'algorithme d'optimisation en fonction de la complexité du problème.

Table 6 : Paramétrage type de l'algorithme d'optimisation

Complexité du problème	Nombre d'itérations	Nombre d'individus	Taux de sélection	Temps de calcul moyen
Simple (1 à 2 couches)	5-10	25	25%	30 s
Moyen (2 à 5 couches)	10-15	25	25%	1 à 2 min
Complexe (> 5 couches)	20-30	100	30%	30 min à 1 h
Inconnue	10	1000	5%	3 h

Le temps de calcul est ici un caractère indicatif, ramené à un seul thread. Il est obtenu avec un ordinateur de bureau sous Windows 7 64 bits, équipé d'un processeur Intel Xeon E5-2670 à 16 threads de 2,6 GHz avec 32 Go de mémoire vive.

3.3. Code d'Optimisation des Performances Solaires (COPS)

Afin de pouvoir travailler sur l'ensemble des couches minces abordées dans nos travaux de thèse et sur des systèmes complets de captation/conversion, nous avons écrit un code spécifique sous Scilab [97] pour déterminer leurs performances solaires. Ce code intègre la modélisation des propriétés spectrales et solaires d'un empilement de couches minces (via les coefficients de Fresnel) ainsi que l'algorithme d'optimisation de ces propriétés décrites précédemment. Nous présentons ici les différentes fonctionnalités du code, baptisé COPS pour « Code d'Optimisation des Performances Solaires ».

3.3.1. Paramètres et fonctions principaux

Données d'entrée : indices de réfraction complexes des matériaux

Pour utiliser ce code, il est indispensable de disposer des données d'entrée nécessaires, en particulier les indices de réfraction complexes de tous les matériaux constituant les couches minces et du substrat sur lequel elles sont déposées, et ce sur un large domaine spectral. Ce

domaine doit idéalement tenir compte de la totalité du spectre solaire (280 à 4000 nm) mais également du spectre du corps noir associé aux pertes thermiques par émission radiative (domaine infrarouge, a minima de 2 à 30 μm). L'ellipsométrie est une méthode de caractérisation non destructive relativement répandue pour déterminer l'indice de réfraction complexe des matériaux, mais les données disponibles dans la bibliographie sont souvent limitées à des domaines spectraux restreints. Il est donc parfois nécessaire de faire des extrapolations, notamment dans le domaine infrarouge.

Nous avons deux critères pour sélectionner dans la littérature les indices de réfraction complexes nécessaires à nos travaux. Notre premier critère est de sélectionner des études sur un domaine spectral proche de celui mentionné ci-dessus, au minimum dans la gamme solaire (280 à 4000 nm), idéalement avec la gamme infrarouge (280 nm à la dizaine de micromètres). Notre second critère est de privilégier des mesures d'indices de réfraction complexes des matériaux issus d'études dédiées aux couches minces, et non à des matériaux massifs. Dans tous les cas, l'indice de réfraction complexe d'un matériau réel dépend des méthodes de mesure et d'élaboration expérimentales, ce qui rend l'appréciation de la validité des données difficile [101].

Le milieu ambiant dans lequel est plongé l'empilement de couches minces a également son propre indice de réfraction complexe. Dans nos études, il s'agit d'air ou de vide. Le vide est le cas le plus simple : son indice de réfraction est égal à 1 et son coefficient d'extinction à 0, quelle que soit la longueur d'onde. L'indice de réfraction de l'air est quant à lui influencé par la température, la pression ou encore l'humidité. La bibliographie propose un indice de réfraction complexe de l'air à 15°C et 1010 hPA comme référence [102].

Interpolation numérique

Une fois l'indice de réfraction complexe d'un matériau particulier obtenu dans la bibliographie, une interpolation des données est nécessaire pour la modélisation. Cette étape permet d'obtenir une discrétisation commune à tous les matériaux de l'étude et aux spectres solaire et corps noir. L'indice de réfraction étant complexe ($N(\lambda) = n(\lambda) + i*k(\lambda)$), l'interpolation doit être effectuée sur les deux composantes n et k . Nous avons opté pour une interpolation linéaire.

Intervalle et pas de discrétisation du domaine spectral

L'étape la plus chronophage de l'optimisation des performances solaires par l'algorithme est le calcul de la fonction spectrale issue des équations de Fresnel. Le nombre de points (longueurs d'onde) nécessaires est déterminé d'une part par le spectre solaire considéré et d'autre part par la gamme spectrale du corps noir à la température choisie. Il convient d'avoir le juste nombre de points pour concilier vitesse de résolution et précision de calcul. Le domaine spectral peut facilement être séparé en deux parties :

- Le domaine de 280 nm à 4000 nm sert au calcul précis des rendements solaires (réflectance, transmittance et absorptance solaires). Ce calcul prend en compte le spectre solaire, dont l'intensité varie radicalement avec la longueur d'onde. Cet intervalle doit donc être finement discrétisé.

- Le domaine au-delà de 4 μm est uniquement utile au calcul de l'émissivité et des pertes radiatives du système étudié. Le comportement du corps noir étant calculé à partir d'une expression mathématique, il est moins sensible aux variations avec la longueur d'onde et la discrétisation de l'intervalle peut être plus grossière.

Ainsi, nous avons sélectionné un pas de discrétisation en longueur d'onde de 5 nm de 280 à 2500 nm pour couvrir la plus grande partie du spectre solaire [33] puis un pas de 50 nm au-delà. Pour conforter ce choix, il est à noter que les indices de réfraction complexes d'un matériau sont rarement étudiés sur plus d'une centaine de points et pratiquement jamais dans l'infrarouge. Utiliser une discrétisation plus fine procurerait donc une précision illusoire, car en réalité des erreurs seraient alors commises lors de l'interpolation linéaire. Afin d'appuyer notre choix, l'erreur d'intégration numérique d'une fonction spectrale dans le visible et dans l'infrarouge en fonction du pas de discrétisation utilisé est détaillée en annexe (§2.1, p.285).

Modification du spectre solaire par d'autres surfaces : application de filtres

Lors de certaines études, nous modifions le spectre solaire incident par une fonction spectrale. Cela nous permet de simuler par exemple une surface recevant un spectre solaire altéré, comme c'est le cas pour un absorbeur placé derrière une vitre, après réflexion du rayonnement incident sur un miroir. Cette fonction spectrale correspond à un filtre, une valeur spectrale adimensionnelle comprise entre 0 et 1 qui modifie l'irradiance spectrale solaire ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{nm}^{-1}$) et donc l'irradiance totale (W/m^2) reçues. La fonction spectrale filtre (en entrée) utilisée pour une surface donnée est celle imposée par la surface précédente.

3.3.2. Fonctions secondaires : études sur la rugosité et l'épaisseur des couches

Les performances solaires d'un empilement de couches minces déposé expérimentalement sont différentes de celles d'un empilement idéal simulé sur ordinateur. Différentes incertitudes liées à l'élaboration peuvent en effet influencer les performances d'un empilement réel par rapport au cas théorique, en particulier des incertitudes sur l'épaisseur et la composition des couches, ou des interfaces non franches entre couches. Ces phénomènes peuvent être pris en compte lors de la modélisation avec le Code d'Optimisation des Performances Solaires (COPS), afin de déterminer la sensibilité des performances solaires à ces incertitudes.

Effet d'une incertitude d'épaisseur ou de fraction volumique sur les performances optiques

Les empilements de couches minces réellement élaborés sont sujets à des incertitudes expérimentales sur l'épaisseur ou la composition, plus ou moins importantes selon la technologie de dépôt de couches minces choisie. L'incertitude est considérée comme un écart de l'une des variables par rapport à une valeur cible. Par exemple, une incertitude de ± 5 nm sur une couche de 100 nm signifie que l'épaisseur varie aléatoirement entre 95 et 105 nm. L'incertitude peut également toucher la fraction volumique dans le cas de matériaux composites modélisés par EMA. Par exemple, une fraction volumique de 50% à $\pm 2\%$ signifie des fractions volumiques comprises entre 48 et 52%.

Une fonctionnalité de COPS permet d'étudier l'impact de ces incertitudes sur les performances solaires de l'empilement. Un schéma illustratif de la méthode est présenté sur la Figure 30 pour un empilement de deux couches minces. L'utilisateur fixe à chaque variable du problème (ici les épaisseurs des deux couches) une valeur cible (par exemple, une épaisseur de 100 nm pour la couche n°1) et une incertitude associée (par exemple, ± 10 nm). Le programme part de chaque valeur cible puis soustrait ou ajoute aléatoirement une valeur comprise entre zéro et l'incertitude étudiée. La quantité ajoutée ou soustraite est générée aléatoirement. Le programme calcule ensuite les performances optiques ou solaires de cet empilement qui a dévié aléatoirement de la valeur cible. Le programme effectue un nombre important de fois cette opération (> 1000) afin de générer un grand nombre d'individus tous différents évoluant dans la fourchette d'incertitude.

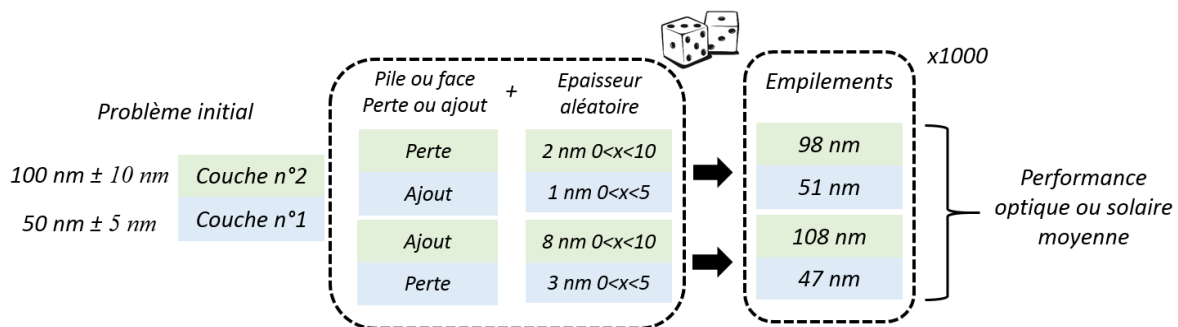


Figure 30 : Schéma de la méthode de calcul de l'incertitude sur les épaisseurs d'un empilement de deux couches minces, pour l'étude de l'impact sur les performances optiques

Cette méthode permet d'avoir une représentation moyenne de l'impact de l'incertitude en épaisseur ou en composition des couches minces de l'empilement, et de représenter soit les performances moyennes d'un grand nombre d'échantillons, soit la performance macroscopique d'un échantillon dont les paramètres varient à l'échelle microscopique. Dans le cas d'une étude avec plusieurs couches minces, l'incertitude de dépôt peut être différente entre chaque couche.

Cette fonctionnalité permet en outre de quantifier la sensibilité des performances à la précision d'épaisseur ou de composition des couches de l'empilement. Ceci peut permettre d'orienter et/ou de justifier le choix d'une méthode de dépôt pour ces couches. Par exemple, si l'épaisseur de la couche doit être très précisément maîtrisée pour assurer la fonction optique désirée, des techniques de dépôt sous vide, plus chères, mais plus précises, devront être préférées. C'est par exemple le cas de la couche métallique intermédiaire dans des empilements sélectifs [103] (voir Figure 115, p.213 du chapitre VI).

Effet de la rugosité de surface et aux interfaces entre couches minces sur les performances optiques

Sur un dépôt réel, la séparation entre deux couches minces, ou entre une couche mince et le substrat ou le milieu ambiant, peut ne pas être parfaite. Une zone tampon, constituée des deux matériaux de part et d'autre de l'interface, peut donc exister entre les deux couches minces, du fait de la rugosité de la couche inférieure. Cette rugosité, qu'elle soit présente entre deux couches minces successives dans un empilement, ou en surface de l'architecture (rugosité

couche superficielle/milieu ambiant) peut être modélisée par les EMA [75] en utilisant le modèle de Bruggeman [104] (voir chapitre I, §5.4 p.58). En considérant une rugosité moyenne arithmétique (notée σ_{ra}), on peut modéliser un milieu intermédiaire composé de 50% de la couche mince inférieure (n°1) et de 50% de la couche supérieure (n°2), comme illustré par la Figure 31. On insère alors une couche de ce "matériau composite" dans la description de l'empilement.

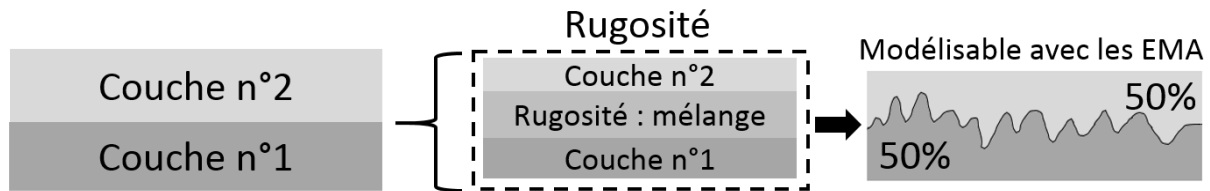


Figure 31 : Principe de la modélisation par EMA de la rugosité entre deux couches minces

IV. Conclusion du chapitre II

Les deux outils de modélisation décrits dans ce chapitre vont permettre de simuler et d'optimiser les performances des composants assurant les trois fonctions optiques que l'on retrouve dans les collecteurs solaires (miroir, vitre, absorbeur, vus dans le chapitre I) en fonction des conditions solaires locales.

Grâce à ces outils, nous pourrions étudier dans les chapitres IV à VI l'impact des conditions locales sur les performances des revêtements solaires et tenter d'optimiser certaines solutions couches minces représentatives données par la littérature pour chacune des fonctions optiques d'intérêt (réflexion, transmission, absorption).

Dans une première étape, nous allons utiliser dans le chapitre suivant le logiciel de simulation de spectres solaires SMARTS-2, couplé à la base de données atmosphérique AERONET [105] pour calculer les spectres solaires locaux de plusieurs sites représentatifs mondiaux.

Chapitre III

Modélisation de spectres solaires locaux

I. Introduction du chapitre III

Dans ce chapitre, nous allons utiliser le logiciel SMARTS-2 décrit précédemment, afin de modéliser des spectres solaires issus de conditions atmosphériques locales. La principale difficulté est de s'assurer de la représentativité des spectres solaires modélisés, afin d'avoir un spectre solaire suffisamment représentatif d'un lieu donné sur des durées importantes. Pour cela, nous avons commencé par une analyse de sensibilité pour identifier les paramètres atmosphériques significatifs pour le calcul d'un spectre solaire dans SMARTS-2, ce qui nous a permis de sélectionner une base de données atmosphériques adéquate. Ensuite, après avoir retrouvé le spectre solaire de référence mondiale, nous avons modélisé deux séries de spectres solaires locaux pour 14 différents sites répartis sur la planète à partir du spectre solaire extraterrestre et des données météorologiques locales. Les spectres solaires de référence et locaux serviront dans la suite de l'étude.

II. Analyse de sensibilité

Avant de modéliser des spectres solaires locaux, nous avons effectué une analyse de sensibilité paramétrique du logiciel SMARTS-2. Le but est d'étudier l'impact des principaux paramètres d'entrée nécessaires à SMARTS-2, évoqués dans le chapitre II (facteur AM, turbidité, vapeur d'eau, etc.), sur l'irradiance (W/m^2) et l'irradiance spectrale (en $\text{W/m}^2\text{nm}^{-1}$) des spectres solaires modélisés (Direct et Circumsolaire, DC). L'objectif est d'identifier les paramètres ayant le plus d'impact. En effet, nous allons devoir par la suite rechercher des valeurs précises de ces paramètres dans des bases de données atmosphériques pour modéliser les spectres solaires locaux. Or, aucune base de données ne réunit tous les paramètres nécessaires, il est donc essentiel de connaître les paramètres les plus influents afin de faire un choix pertinent de base de données.

Pour effectuer l'étude de sensibilité, nous fixons d'abord tous les paramètres d'entrée de SMARTS-2 en utilisant les valeurs correspondant au spectre solaire de référence ASTM G173-03 DC (voir annexe §3.1, p.287). Nous étudions ensuite la sensibilité des paramètres un par un, en fixant tous les autres. Pour chaque paramètre étudié, nous avons préalablement déterminé son domaine de variation plausible à partir des bases de données atmosphériques ([86], [105]). Pour chaque valeur d'entrée nous relevons en sortie l'irradiance et l'irradiance spectrale DC que SMARTS-2 a modélisées. Nous donnerons ici un bilan pour les paramètres étudiés selon deux catégories, en les classant du plus influent au moins influent.

2.1. Paramètres les plus influents

Turbidité atmosphérique

La turbidité atmosphérique (AOD, pour Aerosol Optical Depth) à 500 nm permet de quantifier la transparence de l'atmosphère en étudiant l'atténuation du rayonnement par les

différents aérosols. L'AOD est décrit précisément dans le paragraphe 2.1 du chapitre II, p.66. Pratiquement nous observons dans les bases de données une grande disparité de la turbidité entre les différents lieux sur Terre [105]. Les valeurs courantes sont comprises entre 0 et 0,5 mais peuvent parfois être supérieures à 1,5 voire 2,0 pour des épisodes climatiques particuliers [106]. Nous avons donc étudié une plage de AOD de 0 à 2, mais illustrons uniquement ici l'impact des valeurs comprises entre 0 et 0,5 (Figure 32).

La turbidité a un impact important sur l'irradiance spectrale (Figure 32, gauche). Les courtes longueurs d'onde (ultraviolet et visible) sont plus fortement impactées que les longueurs d'onde du proche et lointain infrarouge. Cela est dû aux diffusions de Rayleigh et de Mie [107]. Une augmentation de la turbidité de 0,1 conduit approximativement à une perte de $0,2 \text{ W/m}^2\text{nm}^{-1}$, majoritairement dans le visible. Pour l'irradiance (Figure 32, droite), cette même augmentation de la turbidité de 0,1 à 0,2 entraîne une perte de 80 W/m^2 , c'est-à-dire que l'irradiance chute de 890 W/m^2 à 810 W/m^2 . La décroissance de l'irradiance avec la turbidité est proche d'une courbe linéaire.

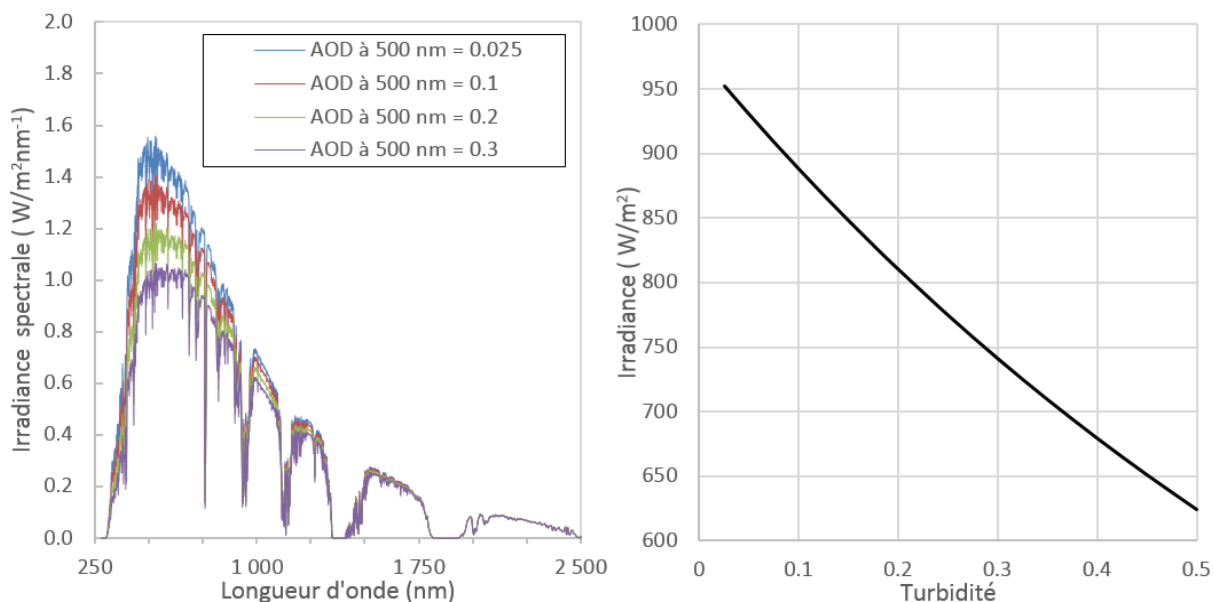


Figure 32 : Impact de la turbidité (AOD à 500 nm) sur l'irradiance spectrale (gauche) et sur l'irradiance (droite)

Facteur Air Mass et position géographique

Le facteur Air-Mass (AM) est décrit en détail dans le chapitre II, §2.1. Sommairement, il s'agit de l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire. Pour l'épaisseur de l'atmosphère à l'équateur, SMARTS-2 utilise la valeur de 100 km (ligne de Kármán [86]). L'analyse de sensibilité montre que l'influence du facteur AM sur l'irradiance et l'irradiance spectrale est importante (Figure 33). Les courtes longueurs d'onde, notamment les UV et le visible, sont fortement impactées par l'augmentation du facteur AM, comme l'indique la Figure 33 de gauche. Nous observons, par exemple, une perte d'irradiance spectrale de $0,4 \text{ W/m}^2\text{nm}^{-1}$ entre un facteur AM très faible (AM1, soit un soleil à midi solaire à l'équateur) et un facteur AM modéré (AM2, soit une épaisseur deux fois plus importante). Ceci est en partie lié aux

diffusions de Rayleigh et de Mie [84] pour les courtes longueurs d'onde, ainsi qu'à l'épaisseur d'atmosphère traversée supplémentaire qui augmente l'absorption. En effet, un facteur AM plus important augmente par extension l'épaisseur (quantité) des gaz traversée, par exemple la hauteur de colonne de vapeur d'eau. L'impact du facteur AM est particulièrement visible si l'on trace l'irradiance en fonction de celui-ci (Figure 33, droite). Nous observons une perte de l'ordre de 180 W/m^2 entre un facteur AM1 et un facteur AM2.

La position géographique du site (latitude, longitude, altitude) joue le même rôle que le facteur AM. Elle impacte en effet elle aussi l'épaisseur d'atmosphère traversée par les rayons du soleil (voir chapitre II, Figure 25, p.67).

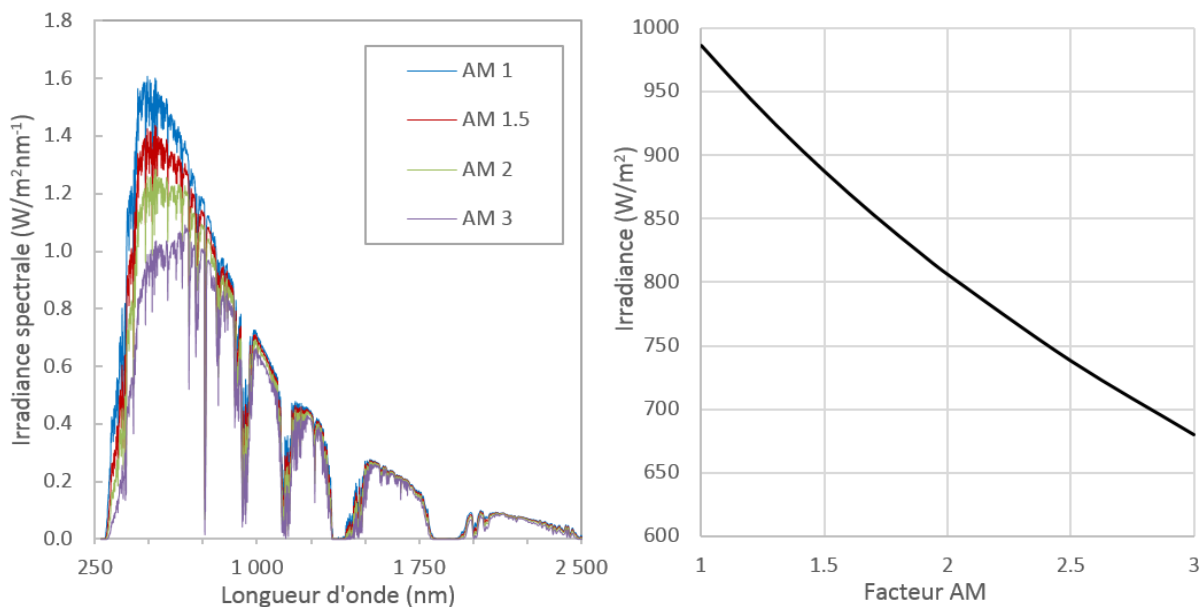


Figure 33 : Influence du facteur Air Mass (AM) sur l'irradiance spectrale (gauche) et l'irradiance (droite)

Vapeur d'eau

La vapeur d'eau dans l'atmosphère est le principal gaz à effet de serre [108]. La quantité de vapeur d'eau est exprimée dans SMARTS-2 en hauteur de colonne d'eau, en cm (voir chapitre II). La Figure 34 indique l'irradiance du spectre solaire en fonction de la quantité de vapeur d'eau de l'atmosphère (hauteur de colonne d'eau en cm).

La différence observée sur l'irradiance est importante, de l'ordre de 150 W/m^2 entre une atmosphère relativement sèche (0,25 cm de vapeur d'eau) et une atmosphère humide (6 cm de vapeur d'eau). La correspondance entre l'irradiance et la hauteur de colonne de vapeur d'eau est quasi logarithmique (Figure 34). L'impact de la quantité de vapeur d'eau sur l'irradiance spectrale n'est pas représenté ici. Le spectre obtenu est complexe, avec la présence de très nombreux pics d'absorption dus à l'eau.

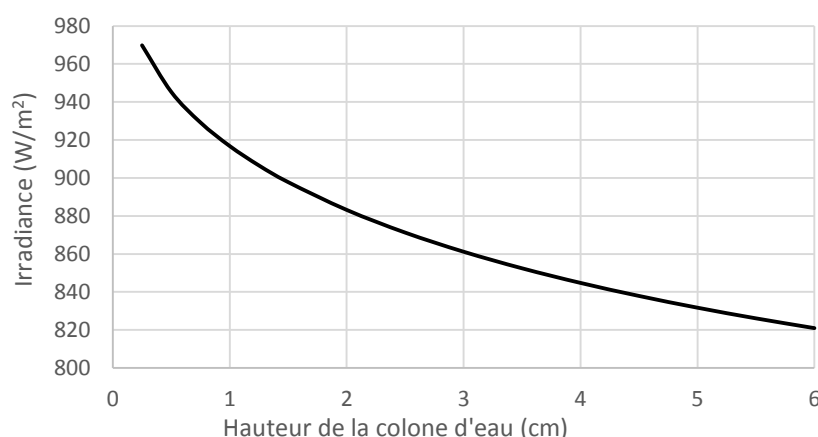


Figure 34 : Effet de la hauteur de colonne d'eau sur l'irradiance solaire

Modèle atmosphérique

La turbidité est exprimée monochromatiquement (chapitre II, §2.1, équation (II-2)). Le modèle dit atmosphérique permet quant à lui de décrire la dispersion de la turbidité par rapport à la longueur d'onde, sur l'ensemble du spectre solaire, en détaillant la distribution de la taille des particules présentes dans l'atmosphère à l'aide d'un exposant Angström ($\ddot{A}$, chapitre II, équation (II-3)). Pour être plus précis, SMARTS-2 utilise deux coefficients Angström sur deux gammes de longueurs d'onde : $\ddot{A}_1$ de 340 à 500 nm et $\ddot{A}_2$ de 500 à 870 nm. Ces coefficients peuvent être obtenus par deux méthodes :

1. En utilisant un modèle atmosphérique préconfiguré qui contient déjà ces coefficients. SMARTS-2 propose 11 modèles issus de quatre auteurs différents (S&F, SRA, Braslau&Dave et Desert), déclinés en différentes variantes (désertique, urbain, rural, etc.) pour tenir compte des grandes tendances atmosphériques.
2. En utilisant directement deux exposants Angström centrés sur 500 nm calculés à partir de plusieurs mesures de l'atmosphère. Les données peuvent être issues d'une base de données comme AERONET qui estime ces exposants de façon routinière [105].

Pour notre étude de sensibilité nous avons utilisé les modèles atmosphériques. Nous avons pris comme référence le modèle S&F Rural utilisé dans les spectres ASTM G173-03. Comme le montre la Table 7, les écarts d'irradiance obtenus avec les différents modèles atmosphériques sont faibles. Au maximum nous observons un écart relatif de l'ordre de 3%, soit une différence de l'ordre de 25 W/m² par rapport au spectre solaire ASTM G173-03 DC (900 W/m²).

L'impact sur l'irradiance spectrale est visible entre deux modèles, mais également faible. Cet écart n'est pas spectralement démarqué, toutes les longueurs d'onde sont également impactées, c'est pourquoi nous ne l'avons pas représenté. Le résultat est identique si l'on utilise les exposants Angström au lieu d'un modèle atmosphérique, les valeurs ne sont donc pas plus montrées ici.

Table 7 : Ecart sur l'irradiance selon les différents modèles atmosphériques

Nom	Irradiance	Ecart relatif sur irradiance avec S&F Rural
S&F Rural	900,9 W/m ²	0,00%
S&F Urbain	901,6 W/m ²	-0,06%
S&F Maritime	896,9 W/m ²	0,44%
S&F Troposphérique	904,2 W/m ²	-0,37%
SRA Continental	899,3 W/m ²	0,17%
SRA Urbain	900,0 W/m ²	0,10%
SRA Maritime	875,7 W/m ²	2,80%
Braslau&Dave C	874,1 W/m ²	2,97%
Braslau&Dave C1	877,4 W/m ²	2,60%
Desert Min	900,6 W/m ²	0,03%
Desert Max	865,1 W/m ²	3,97%

La turbidité, le facteur Air Mass, la teneur en vapeur d'eau, et le modèle atmosphérique, ici classés du plus influent au moins influent, sont les paramètres les plus sensibles pour l'irradiance et l'irradiance spectrale. Les paramètres présentés dans la suite ont moins d'impact.

2.2. Paramètres moins sensibles

Degré de pollution gazeuse

SMARTS-2 peut intégrer la pollution gazeuse de l'atmosphère. Pour cela l'utilisateur choisit un modèle préconfiguré parmi quatre disponibles (aucune, légère, modérée ou sévère) ou rentre manuellement la concentration de dix différents gaz : CH₂O, CH₄, CO, HNO₂, HNO₃, NO, NO₂, NO₃, O₃ et SO₂. Les concentrations correspondant aux quatre degrés de pollution sont présentées en annexe (§3.2, p.287).

La Table 8 donne l'irradiance solaire en fonction du degré de pollution calculée dans SMARTS-2. Les autres paramètres utilisés pour la simulation sont ceux du spectre solaire ASTM G173-03 (annexe §3.1, p.287). L'écart est rapporté à l'irradiance du spectre ASTM G173-03 DC. Selon les trois premiers des quatre modèles, la diminution d'irradiance par rapport au spectre solaire ASTM G173-03 DC est faible : l'écart à la référence est inférieur à 0,8% même pour une pollution modélisée comme modérée. Elle est par contre importante pour une pollution modélisée comme forte (perte de 6,5%).

Table 8 : Irradiance solaire en fonction du degré de pollution

Nom selon SMARTS-2	Irradiance solaire	Ecart
« ASTM G173-03 »	900,87 W/m ²	0.00%
« Pristine »	902,18 W/m ²	+0,15%
« Light pollution »	899,03 W/m ²	-0,20%
« Moderate pollution »	893,82 W/m ²	-0,78%
« High pollution »	842,38 W/m ²	-6,49%

Concentrations de CO₂ et de O₃

La concentration en dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, bien qu'en constante augmentation, est uniformément répartie sur Terre (entre 380 et 415 ppmv en 2015 [78]). De même, l'ozone (O₃) est relativement uniformément répartie sur Terre pour des latitudes propices au CSP, avec des concentrations comprises entre 300 et 350 unités Dobson [78].

Nous avons étudié l'influence des concentrations en CO₂ et O₃ sur l'irradiance et l'irradiance spectrale. Leurs concentrations respectives ont été variées d'un facteur de 0,25 à 2 par rapport aux valeurs de référence utilisées pour le spectre ASTM G173-03 DC (annexe §3.1, p.287).

La concentration de CO₂ a peu d'influence (Figure 35, gauche). L'irradiance diminue linéairement lorsque la concentration de CO₂ augmente, et varie d'environ $\pm 0,3\%$ soit ± 3 W par rapport à la valeur de référence. L'impact de la concentration en CO₂ sur l'irradiance spectrale n'est pas représenté ici. Les nombreux pics d'absorption du CO₂, dont les deux principaux sont situés entre 1565 et 1675 nm puis entre 1875 et 2195 nm [109], augmentent avec la concentration en CO₂.

L'influence de la concentration en O₃ sur l'irradiance et l'irradiance spectrale est légèrement plus marquée (Figure 35, droite). L'irradiance diminue linéairement lorsque la concentration en O₃ augmente, avec des écarts de l'ordre d'une dizaine de Watts par rapport à la valeur de référence, soit entre -1% et +1,5%. Spectralement, on a pu observer l'augmentation des pics d'absorption de l'ozone entre 280 et 300 nm puis entre 450 et 750 nm [82] lorsque la concentration en ozone augmente. Les résultats ne sont pas montrés ici.

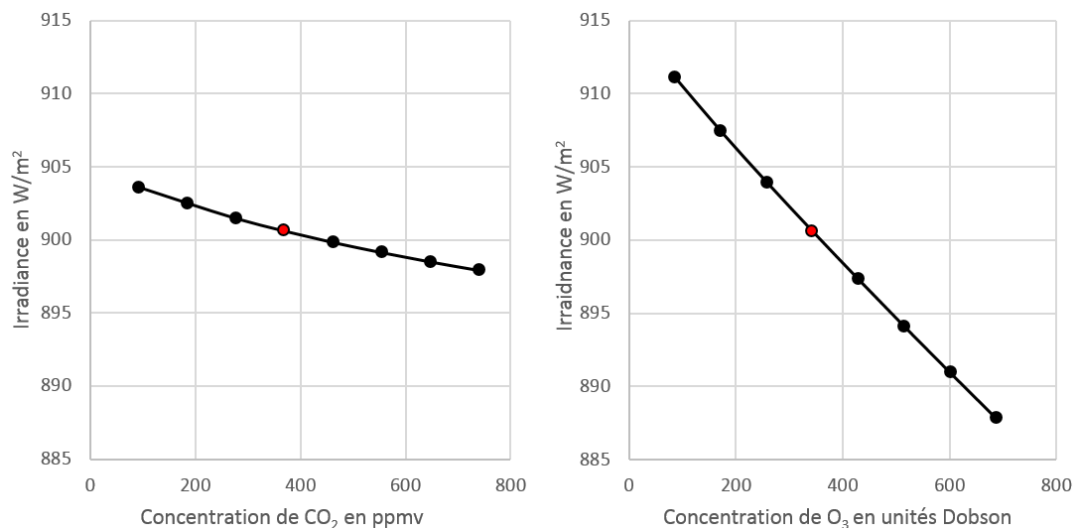


Figure 35 : Irradiance en fonction des concentrations de CO₂ et de O₃ dans l'atmosphère (en rouge, la valeur de référence ASTM G173-03)

Les concentrations en CO₂ et O₃ ont donc un impact très limité sur l'irradiance et l'irradiance spectrale. Pour observer des changements de valeur d'irradiance, il faut drastiquement modifier les concentrations en CO₂ et O₃, au-delà des valeurs réalistes ([108], §3.2, p.287).

Rayonnement circumsolaire

Le rayonnement solaire direct est par définition celui qui provient du disque solaire. Le rayonnement circumsolaire fait quant à lui référence à la lumière qui, pour un observateur sur Terre, semble provenir de la zone autour du disque solaire (Figure 36). Il est dû à la diffraction des photons par les particules présentes dans l'atmosphère, et dépend donc de la turbidité (AOD dans notre étude). Une portion non négligeable du flux solaire peut être déviée, jusqu'à des angles de plusieurs degrés. Or, les systèmes de concentration solaire ne peuvent concentrer que le rayonnement direct et une faible proportion de rayonnement circumsolaire. On définit un angle d'acceptance au-delà duquel le rayonnement circumsolaire ne peut être concentré. Le spectre solaire ASTM G173-03 Direct + Circumsolaire (DC) tient compte d'un rayonnement circumsolaire avec un angle d'acceptance de $2,9^\circ$. Les normes ISO 9060 et ISO 1990 autorisent une valeur de $2,5^\circ$.



Figure 36 : Schéma du rayonnement circumsolaire et photographie du circumsolaire selon deux conditions météorologiques (journée ensoleillée et partiellement nuageuse)

SMARTS-2 permet de modéliser le rayonnement direct seul, circumsolaire seul, et la somme des deux (Direct + Circumsolaire, abrégé DC) selon les besoins de l'utilisateur. Nous avons calculé la part du rayonnement circumsolaire seul dans le rayonnement DC en fonction de l'angle d'ouverture (de $0,25^\circ$ à $2,9^\circ$), pour trois différentes turbidités AOD à 500 nm de 0,084 (valeur de référence pour les spectres ASTM G173-03), 0,42 (référence x 5) et 0,84 (référence x 10) (Figure 37). Nous observons que même pour des turbidités et des angles d'acceptance élevés, le rayonnement circumsolaire ne représente au maximum que 2% du rayonnement DC. Pour une turbidité de 0,084 le circumsolaire ne représente que $2,2 \text{ W/m}^2$ soit 0,25% de l'irradiance avec une ouverture maximum ($2,9^\circ$). L'angle d'acceptance influence donc très peu l'irradiance directe et nous conserverons la valeur de $2,9^\circ$, utilisée dans le spectre de référence ASTM.

Albédo ou nature de l'environnement

L'albédo représente la réflectance de l'environnement autour du site dû à la nature du sol ou la présence de végétation, de bâtiments, etc. Ce paramètre impacte uniquement le rayonnement diffus, il n'est donc pas pertinent dans notre étude.

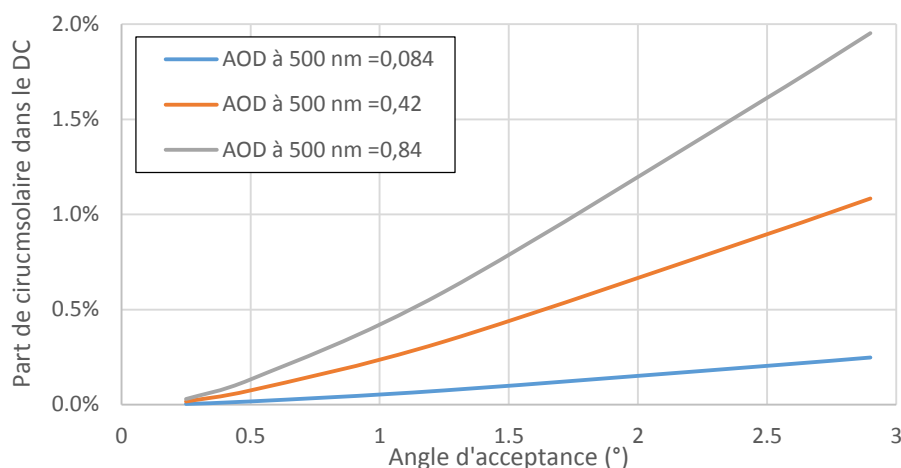


Figure 37 : Part de rayonnement circumsolaire en fonction de l'angle d'acceptance pour 3 valeurs d'AOD à 500 nm

2.3. Conclusion sur l'étude paramétrique

En conclusion, les paramètres atmosphériques ayant un impact significatif sur la modélisation d'un spectre solaire sont la turbidité (et sa dispersion spectrale incluse dans les modèles atmosphériques), le facteur Air Mass et la quantité de vapeur d'eau. Ces paramètres peuvent réduire la densité de flux solaire (irradiance) de plusieurs centaines de W/m^2 . Comparativement, l'irradiance spectrale ($\text{W/m}^2/\text{nm}$) et l'irradiance (W/m^2) sont peu sensibles aux autres paramètres étudiés tels que le degré de pollution, les concentrations en CO_2 et O_3 , l'angle d'acceptance du rayonnement circumsolaire, etc.

Il est indispensable d'obtenir des données fiables et locales pour les trois paramètres les plus influents. La base d'AERONET contient l'ensemble de ces données [105]. Elle permet d'adapter le modèle atmosphérique en utilisant directement les exposants Angström pour calculer la répartition spectrale de la turbidité. L'obtention des paramètres manquants, comme le degré de pollution gazeuse, ou la concentration de CO_2 et d' O_3 est quant à elle difficile, voire impossible : nous n'avons pas pu recueillir suffisamment de données concordantes entre elles pour toutes les localisations choisies. Nous avons donc utilisé les valeurs du spectre solaire de référence pour ces paramètres moins influents.

III. Modélisation de spectres solaires locaux

Sur les bases de l'analyse de sensibilité, nous avons effectué plusieurs séries de modélisations pour obtenir des spectres solaires locaux, c'est-à-dire représentatifs de lieux précis sur la planète. Les spectres solaires calculés dans ce chapitre et utilisés par la suite sont de trois natures :

1. Nous avons d'abord simulé le spectre solaire de référence mondiale ASTM G173-03 DC à partir de ses conditions atmosphériques spécifiques trouvées dans la littérature [81].

2. Nous avons ensuite simulé des spectres solaires de six lieux spécifiques de la planète présentant d'importantes singularités. Le but de cette démarche est d'obtenir des spectres solaires très disparates, tout en restant représentatifs pour les applications CSP.
3. Nous rapportons enfin le cas de spectres solaires locaux pour huit autres sites, utilisés dans une étude similaire destinée au photovoltaïque sous concentration (CPV) menée au laboratoire PROMES [94]. La démarche était similaire à la nôtre (point n°2), mais différente par les sites choisis et par la quantité de spectres générés pour chaque site. En effet, en travaillant directement avec le concepteur de SMARTS-2, les auteurs ont généré un spectre solaire correspondant à chaque point de mesure des paramètres atmosphériques présent dans la base AERONET, soit plusieurs milliers de spectres par site sur une durée totale d'un an. A l'aide de cette base de données, nous établirons un spectre représentatif annuel pour chaque site.

A partir de ces différents spectres, nous évaluerons les performances de revêtements solaires étudiés dans les chapitres suivants (IV à VI) afin d'effectuer des optimisations.

3.1. Spectre solaire de référence ASTM G173-03 et US Standard Atmosphere (USSA) de 1976

La référence ASTM G173-03 concerne deux spectres solaires distincts issus des mêmes conditions atmosphériques : un spectre solaire correspondant au rayonnement global pour une surface inclinée à 37° (GT) et un spectre solaire correspondant au rayonnement direct et circumsolaire (DC) (Figure 38). Ces spectres solaires ont été modélisés en juin 1999 avec SMARTS-2 [79] et sont la référence mondiale pour les applications solaires PV et CSP. Les conditions utilisées sont définies à partir d'une moyenne des conditions atmosphériques et météorologiques des États-Unis sur une période d'un an [81]. Le facteur Air Mass y est fixé à 1,5 (spectre solaire AM1.5). Cette valeur a été sélectionnée comme une moyenne représentative de 48 états des USA [81].

Le modèle atmosphérique utilisé pour l'ASTM G173-03 est l'US Standard Atmosphere (USSA) adoptée en 1976 [110]. Elle ne correspond pas à un lieu géographique particulier mais à une moyenne pour les USA. Plusieurs campagnes de mesures de la composition de l'atmosphère et/ou de l'irradiance spectrale ont confirmé des écarts relativement faibles par rapport à ce modèle. La turbidité (AOD) à 500 nm est évaluée à 0,084 par une moyenne de 15 sites répartis sur l'ensemble des USA présentant un ensoleillement supérieur à 6 kWh/m²/an. La hauteur de colonne d'eau choisie est de 1,42 cm. La concentration en CO₂ est de 370 ppmv et celle de O₃ est 343,8 unités Dobson (hauteur de colonne de O₃ = 0,3438 cm) [81], [110]. La pression atmosphérique est fixée à 1013,25 hPa pour une température de 15°C (température moyenne de la Terre). Les paramètres complets utilisés pour la simulation des spectres solaires ASTM G173-03 sont montrés dans les annexes (§3.1, p.287).

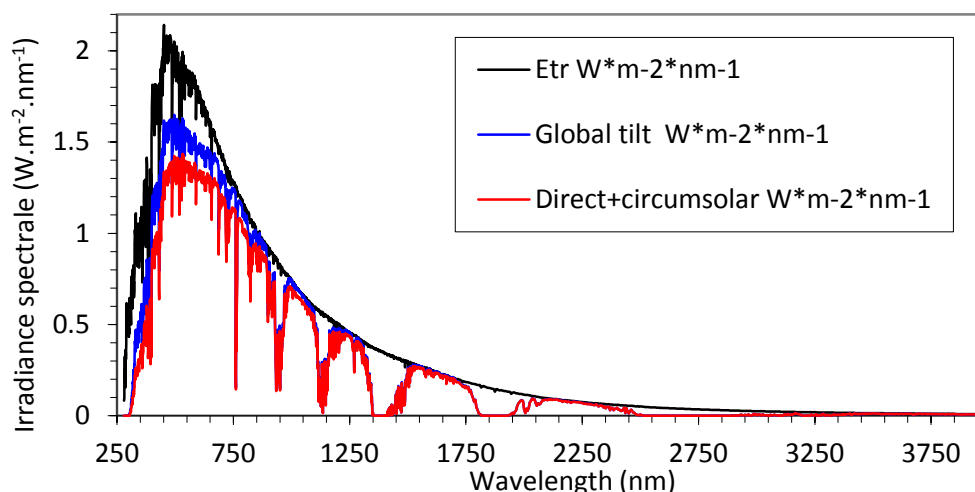


Figure 38 : Spectres solaires de référence ASTM G173-03 Global Tilt et Direct + Circumsolaire modélisés sous SMARTS-2 à partir du spectre solaire extraterrestre

Pour modéliser le spectre solaire ASTM G173-03 DC reçu au sol, la bibliographie utilise comme données d'entrée le spectre solaire extraterrestre synthétique créé par C. Gueymard en 2004 [80] (Figure 38), sélectionné parmi les 9 spectres solaires extraterrestres disponibles dans SMARTS-2. Le spectre extraterrestre est pondéré afin que son intégration en longueur d'onde (irradiance en W/m^2) soit égale à la constante solaire de $1366,1 \text{ W}/\text{m}^2$ [80]. Ceci permet de ne pas tenir compte des variations naturelles de l'irradiance du Soleil reçue sur Terre. Ces variations sont de l'ordre de 3%, soit de $1353 \text{ W}/\text{m}^2$ à $1396 \text{ W}/\text{m}^2$, selon les campagnes de mesure, les auteurs [79], [80], la distance Terre-Soleil ou les éruptions solaires. Le spectre solaire extraterrestre de C. Gueymard créé en 2004 [80] et la constante solaire de $1366,1 \text{ W}/\text{m}^2$ ont également été retenus comme base pour modéliser nos spectres solaires locaux, présentés dans la suite de ce paragraphe.

3.2. Spectres solaires locaux moyens en atmosphère réelle

En plus des spectres de référence mondiale couramment utilisés, nous avons simulé des spectres solaires locaux plus spécifiques. L'analyse de sensibilité précédente a montré la forte influence de la turbidité sur l'irradiance. Pour se rapprocher des conditions réelles, il est nécessaire d'utiliser la turbidité observée pour des sites particuliers. Il n'est en effet pas concevable d'utiliser une même valeur de turbidité pour décrire plusieurs sites répartis sur la planète. Pour cela, le modèle atmosphérique est adapté en conséquence à l'aide des coefficients Angström. La base de données AERONET comporte 836 stations d'analyse de l'atmosphère réparties dans le monde ([105], [77], [111], [112]). Elle propose trois différents niveaux de qualité de données. Nous travaillerons avec le degré de qualité le plus élevé (level 2.0) afin d'utiliser des données fiables, épurées des passages nuageux, pluies, intempéries et des erreurs de mesures.

Nous avons sélectionné six stations réparties sur le globe parmi celles proposant le degré de qualité souhaité (level 2.0). Nous avons recherché des lieux déjà identifiés comme propices au CSP par la bibliographie. La Figure 39 les localise sur une carte de gisement solaire.

1. Paranal, dans le désert d'Atacama au Chili, lieu d'importants investissements CSP du fait de sa ressource solaire la plus élevée du monde (3536 kWh/m²/an).
2. Ouarzazate, au Maroc, proche de la centrale CSP Noor de 500 MW (2500 kWh/m²/an).
3. Sandia, aux États-Unis (état du Nouveau-Mexique), station proche des Sandia National Laboratories avec le second DNI le plus élevé parmi les sites étudiés (2638 kWh/m²/an).
4. Mezaira, aux Emirats Arabes Unis, proche de la centrale CSP Shams (100 MW) avec un DNI de 2034 kWh/m²/an.
5. Montsec, en Espagne, station la plus proche du four solaire d'Odeillo en France avec un DNI de 1800 kWh/m²/an.
6. Brisbane, en Australie, station au centre universitaire en centre-ville la plus proche de la centrale CSP de Krogan Creek (44 MW), qui reçoit un DNI de 1853 kWh/m²/an.

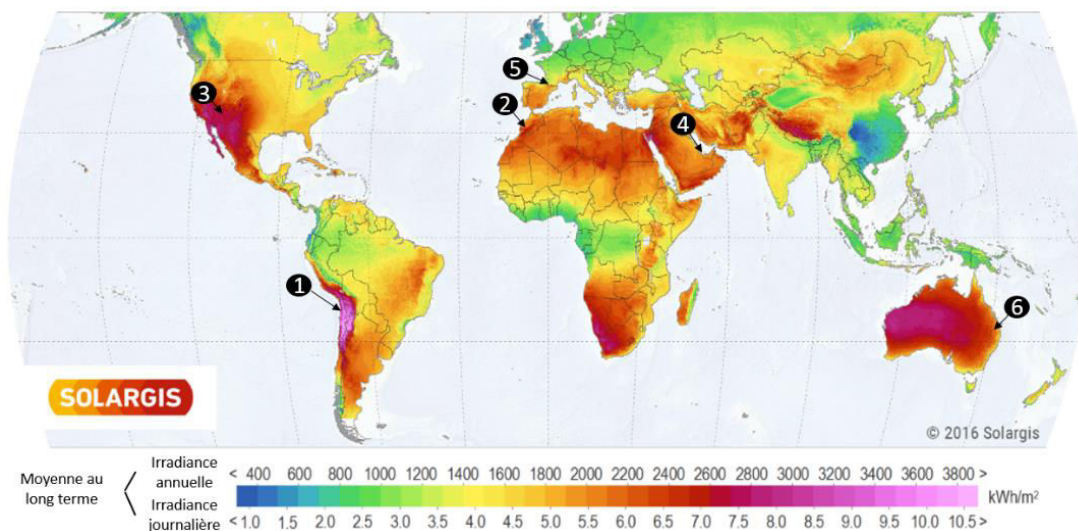


Figure 39 : Répartition géographique et ressource solaire des 6 sites sélectionnés [105]

La difficulté principale est de concilier le fait que les informations atmosphériques disponibles sont variables en durée et en quantité selon les sites, avec une méthodologie qui sera adaptée à toutes les stations. Nous remarquons en particulier que la turbidité (AOD) de l'atmosphère varie durant l'année pour les différents sites choisis (moyennes mensuelles sur la Figure 40). Au sein d'un même mois (un point sur le graphique) les variations de l'AOD sont également importantes mais ne sont pas représentées ici par souci de lisibilité.

Au vu de cette figure, nous avons choisi de modéliser chaque spectre solaire un jour de solstice d'hiver au midi solaire. La turbidité est en effet plus faible pour l'hiver local, notamment pour la station de Mezaira. La variation de turbidité sur le mois est également plus faible à cette saison. Nous retenons le mois de décembre pour l'hémisphère nord (stations symbolisées par un trait plein sur la Figure 40) et le mois de juin pour l'hémisphère sud (stations symbolisées par des pointillés, Paranal et Brisbane).

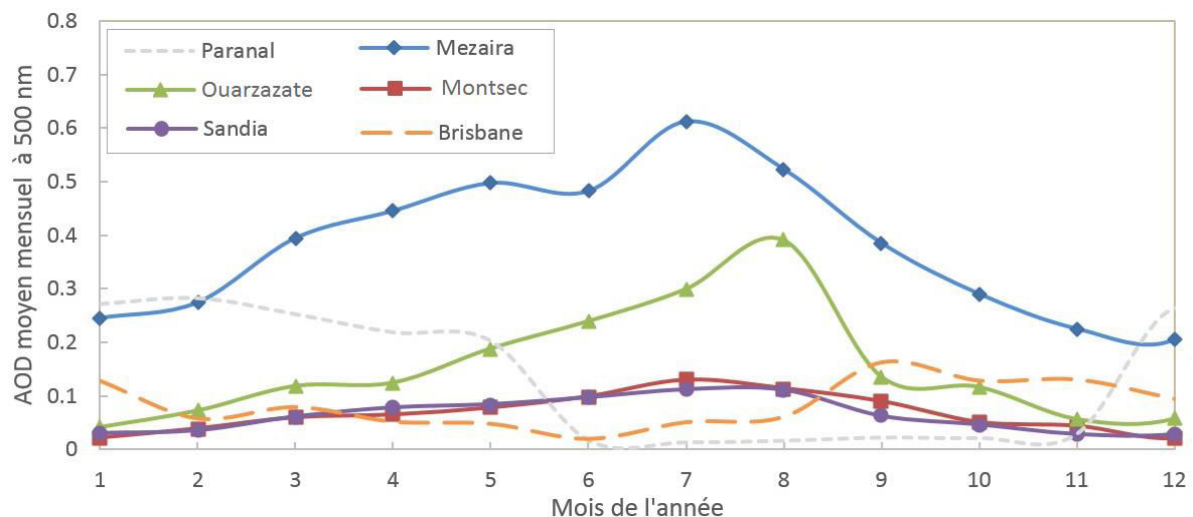


Figure 40 : AOD moyen mensuel des six sites choisis [105]

La Table 9 synthétise les paramètres d'entrée les plus importants, ainsi que l'irradiance annuelle des sites retenus et l'irradiance des spectres solaires moyens modélisés. La liste exhaustive des paramètres d'entrée dans SMARTS-2 est donnée en annexe (§3.3, p.288). Comme les valeurs de turbidité et de quantité de vapeur d'eau obtenues sur AERONET varient beaucoup au cours d'un même mois, à raison de plusieurs valeurs par jour, les valeurs utilisées pour la modélisation sont des moyennes sur le mois du solstice d'hiver (décembre ou juin) en excluant la nuit. Elles sont notées $\langle x \rangle$ dans la Table 9 et sont suivies de l'écart-type pour la turbidité.

Table 9 : Synthèse des paramètres d'entrée et de l'irradiance des spectres solaires issus d'atmosphères réelles [105], [13]

Grandeur	Unité	Paranal	Ouarzazate	Sandia	Mezaira	Montsec	Brisbane
Altitude	m	2154	1136	1662	204	1574	45
Quantité de vapeur d'eau	atm/cm	0,245	0,853	0,398	1,676	0,495	1,226
Turbidité	-	$\langle 0,017 \rangle$; 0,005	$\langle 0,062 \rangle$; 0,040	$\langle 0,025 \rangle$; 0,009	$\langle 0,210 \rangle$; 0,058	$\langle 0,016 \rangle$; 0,004	$\langle 0,020 \rangle$; 0,012
Pollution (SMARTS-2)	-	Pristine	Light	Light	Light	Light	Light
AM	-	1,417	1,714	1,908	1,455	2,399	1,584
Irradiance	W/m ²	1040	958	1014	828	961	920
DNI	kWh/m ² /an	3536	2500	2638	2034	1800	1853

Par cette méthode, nous souhaitons in fine établir un unique spectre solaire moyen par site, afin de les utiliser pour l'optimisation de revêtements solaires dans des conditions locales très variées (chapitres IV à VI). Cette démarche moyennée est également celle utilisée pour les spectres solaires ASTM G173-03 [81] présentés en amont. Les écarts-type sur la turbidité mensuelle sont importants par rapport aux valeurs moyennes. Ils témoignent de la forte variabilité de la turbidité durant le mois. A titre de comparaison, pour l'USSA qui sert à modéliser le spectre ASTM G173-03, la valeur moyenne retenue est de 0,084 pour un écart-type de 0,026 entre les différents sites ($\langle 0,084 \rangle$; 0,026) [81]. Les écarts-types de nos spectres locaux sont du même ordre de grandeur.

L'écart maximum d'irradiance obtenue pour les différents sites est de 230 W/m^2 entre le site recevant l'irradiance la plus forte (Paranal, 1040 W/m^2) et celui recevant l'irradiance la plus faible (Mezaira, 828 W/m^2). À l'exception de Mezaira, toutes les valeurs d'irradiance sont supérieures à celle du spectre solaire de référence ASTM G173-03 DC (900 W/m^2). La bibliographie confirme que le désert d'Atacama (station de Paranal) peut recevoir des irradiances de l'ordre de 1000 à 1100 W/m^2 [113], une campagne de mesures ayant relevé une irradiance de 1040 W/m^2 de février à mars 2016 [114], ce qui est cohérent avec notre calcul. Pour la région de Mezaira, la bibliographie atteste que décembre est le mois le plus favorable (celui que nous avons considéré pour le calcul) et que la turbidité peut fortement impacter l'irradiance le reste de l'année [115]. La valeur que nous avons calculée est donc l'irradiance moyenne mensuelle la plus élevée qui peut être attendue pour ce site.

La Figure 41 illustre l'irradiance spectrale des spectres solaires locaux moyens pour les 6 sites, dont sont issues les valeurs d'irradiance mentionnées ci-dessus (intégration des spectres). On observe que les écarts d'irradiance spectrale sont les plus importants pour les courtes longueurs d'onde, plus particulièrement dans le visible. Cela est lié principalement à la turbidité et au facteur Air Mass dont l'impact sur l'irradiance spectrale est illustré respectivement par la Figure 32 et la Figure 33. Nous observons sur la Figure 41 trois profils clairement démarqués : les spectres solaires d'altitude (Paranal 2154 m et Sandia 1662 m), un groupe de spectres solaires d'allure spectrale proche mais de lieux singulièrement différents (Montsec, Ouarzazate et Brisbane) et un spectre désertique (Mezaira). Les spectres solaires d'altitude donnent les irradiances les plus élevées, supérieures à 1000 W/m^2 (Table 9). Ils ont également une part de rayonnement UV (280 à 380 nm) plus élevée que les autres spectres solaires (Figure 41), car l'épaisseur d'ozone traversée est plus faible pour ces sites. Bien qu'étant également un site d'altitude (1574 m), Montsec a une irradiance et une irradiance spectrale plus faibles que celles des autres sites d'altitude, et plus proches de celles de Ouarzazate et Brisbane. Ceci est dû au fait que le facteur AM de Montsec est plus élevé (2,4) que celui des deux autres sites d'altitude (1,4 et 1,9), car sa latitude ($42^{\circ}03'$) est plus importante : l'épaisseur d'atmosphère traversée étant plus grande, l'irradiance solaire reçue au sol diminue. Bien que les sites de Ouarzazate (1,7) et Brisbane (1,6) aient eux aussi un facteur AM plus faible que Montsec, ce qui devrait leur conférer une irradiance plus élevée, leurs atmosphères se caractérisent par une turbidité et une quantité de vapeur d'eau plus élevées qui diminuent l'irradiance. Ainsi, les effets de la composition de l'atmosphère et du facteur AM se compensent, ce qui entraîne une irradiance équivalente pour ces trois sites (respectivement 958, 920 et 961 W/m^2). Situé en plein désert des Émirats Arabes Unis, le site de Mezaira se distingue par une altitude faible (204 m), beaucoup de vapeur d'eau et une turbidité 2,5 fois supérieure à celle considérée pour les spectres ASTM G173-03. Cela entraîne l'irradiance spectrale la plus faible de tous les sites étudiés, et une irradiance de 828 W/m^2 , soit 72 W/m^2 de moins que la valeur de référence (900 W/m^2).

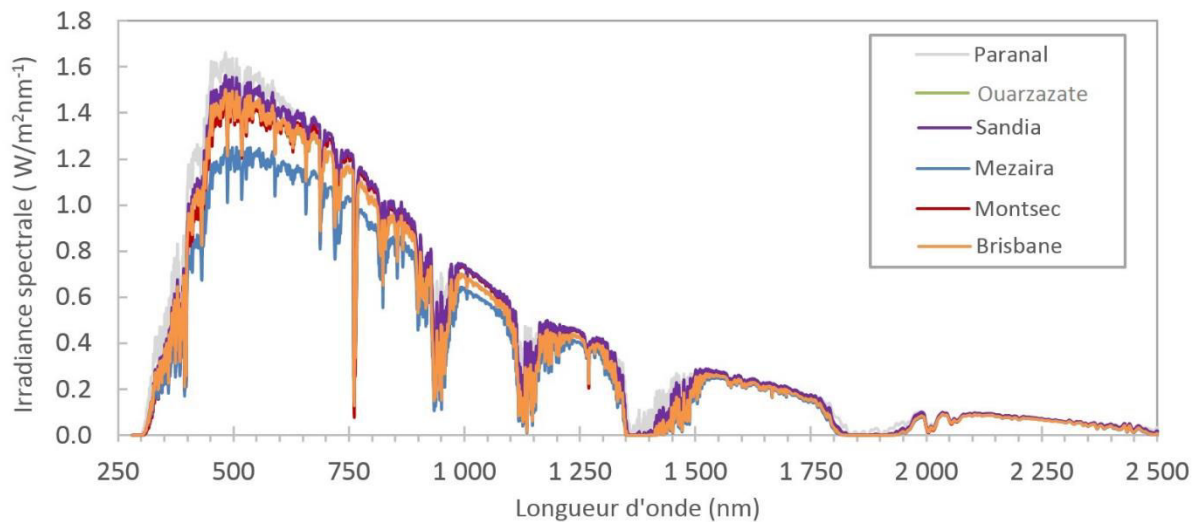


Figure 41 : Irradiance spectrale des spectres solaires locaux

Comme expliqué précédemment, les calculs présentés jusqu'ici considèrent un seul spectre solaire moyen par site, qui nous sera utile en première approximation pour l'optimisation des couches minces dans des conditions locales particulières. Cependant, il faut garder à l'esprit que ces spectres moyens ne sont pas parfaitement représentatifs de la réalité. En effet, les conditions atmosphériques (turbidité, coefficients Angström, vapeur d'eau) et climatiques (température, etc.) évoluent de façon journalière, mensuelle et annuelle sur chaque site (voir l'exemple d'évolution journalière en annexe §3.4, p.289). L'allure de l'évolution de ces paramètres est également différente selon les sites (Figure 40). Par exemple, le rapport entre les valeurs maximale et minimale de turbidité journalière sur l'année peut être drastiquement différent selon le site : proche de 23 pour Mezaira tandis qu'elle est proche de 57 pour Ouarzazate. De même, plus un site est éloigné de l'équateur, plus la différence de facteur AM entre l'été et l'hiver local sera importante.

Pour affiner l'analyse, on peut tenter de s'approcher au mieux des variations spectrales réelles en effectuant un suivi annuel de l'irradiance spectrale. Pour cela il est nécessaire d'automatiser SMARTS-2 pour générer les milliers de spectres solaires par site correspondant à un suivi heure par heure (à minima) sur une année complète. C'est l'objet du paragraphe suivant.

3.3. Suivi annuel de l'irradiance spectrale en atmosphère réelle

Ce type de travaux a été effectué par Alexis Vossier à PROMES [94], en collaboration avec l'auteur de SMARTS-2 (C. Gueymard) car le code du logiciel n'est pas accessible pour l'utilisateur. Ces travaux ont permis de réaliser le suivi de l'irradiance spectrale directe et circumsolaire (DC) de 8 sites répartis sur le globe, sur un pas de temps très faible (de l'ordre de l'heure) et durant une année complète. Ils ont obtenu plusieurs milliers de spectres solaires par site. Les données atmosphériques étaient fournies par la base AERONET [105]. Un exemple de l'évolution de l'irradiance sur une semaine pour la station de Dakar au Sénégal est présenté sur la Figure 42. Chaque point correspond à l'intégration en longueur d'onde d'un spectre

solaire issu des conditions atmosphériques locales à une heure précise. Le même type de résultats sur une année complète a été calculé pour les 8 sites illustrés sur la Figure 43.

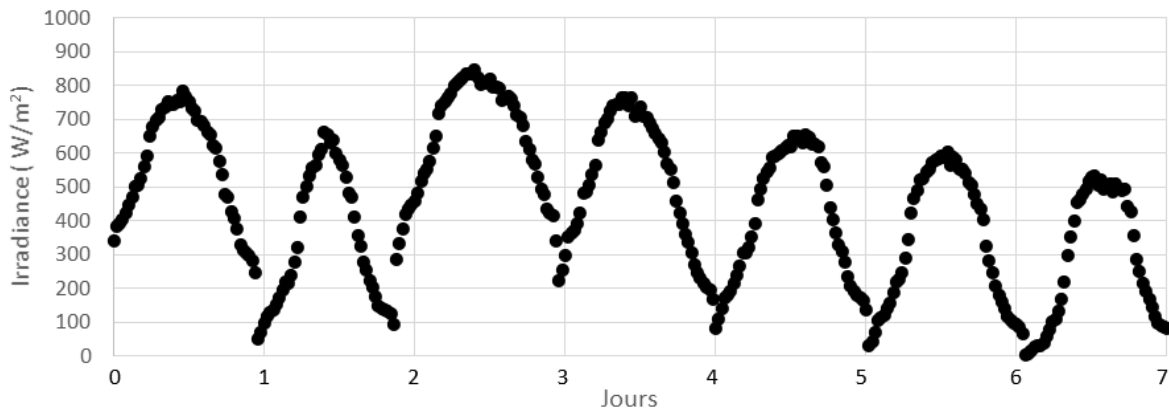


Figure 42 : Exemple du suivi de l'irradiance DC pour 7 jours à Dakar, Sénégal [94]

Nous avons pu obtenir auprès des auteurs de cette étude l'ensemble des données brutes pour les 8 sites répertoriés sur la Figure 43. Le choix des sites est plus hétéroclite que précédemment et correspond plutôt à une étude sur le PV puisque quatre d'entre eux (Palaiseau, Ilorin, Dakar et Xianghe) ne sont pas compatibles avec le CSP, car l'irradiance directe (DNI) annuelle y est largement inférieure à 2000 kWh/m²/an.

1. Palaiseau, en France, proche de Paris, avec un DNI annuel de 1021 kWh/m²/an.
2. Ilorin, capitale de l'état de Kwara au Nigeria, avec un DNI annuel faible de 976 kWh/m²/an dû à l'atmosphère très poussiéreuse (AOD élevé).
3. Nauru, état insulaire d'Océanie situé en Micronésie, avec un DNI annuel de 1892 kWh/m²/an soit proche de la valeur recommandée pour le CSP (2000 kWh/m²/an).
4. Dakar, au Sénégal, avec un DNI annuel de 1523 kWh/m²/an.
5. Xianghe, en Chine dans la province de Langfang, avec un DNI annuel de 1157 kWh/m²/an.
6. Sede Boker, dans le désert du Néguev au sud d'Israël, avec un DNI annuel de 2447 kWh/m²/an, soit une irradiance compatible avec l'installation de CSP.
7. Solar Village, dans le désert d'Arabie Saoudite, avec un DNI annuel de 1690 kWh/m²/an.
8. Izana, dans les Îles Canaries, avec un DNI de 1884 kWh/m²/an.

A partir de ces nombreux spectres, nous avons calculé un spectre solaire représentatif des conditions annuelles pour chaque site. La base de données AERONET contient de nombreuses données pour les premières heures du matin et les dernières heures du soir, car les conditions atmosphériques y varient rapidement. Il y a donc davantage de spectres solaires peu énergétiques, représentatifs de ces conditions, dans la base de données. Inversement, les spectres solaires à forte irradiance, représentatifs du milieu de journée, sont moins nombreux.

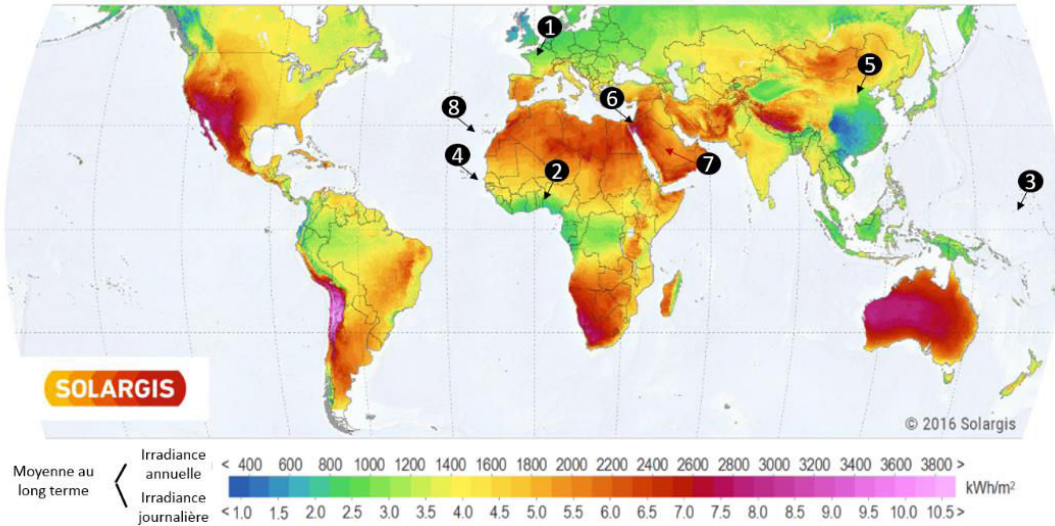


Figure 43 : Répartition géographique et ressource solaire des 8 sites étudiés [94]

Pour remonter à un spectre solaire représentatif annuel, la méthode suivante est appliquée. L'irradiance de chaque spectre solaire ponctuel (I en W/m^2) est intégrée par le temps de mesure entre deux spectres (Δt , intervalle de temps durant lequel le spectre ponctuel est représentatif), ce qui permet de déterminer l'énergie incidente correspondante sur ce laps de temps (en kWh/m^2). En répétant ce calcul pour tous les spectres d'un même site et en additionnant les valeurs obtenues, nous remontons à l'irradiance annuelle pour le site considéré (I_{an} en $\text{kWh/m}^2/\text{an}$). La valeur obtenue est différente de celle donnée sur la Figure 43, car la couverture annuelle dans AERONET n'est pas parfaite. En fonction des sites, il peut en effet manquer les spectres solaires de plusieurs dizaines de jours répartis sur l'année. Toutefois l'irradiance annuelle calculée nous permet ensuite de déterminer la contribution (I/I_{an}) de chaque spectre solaire disponible dans l'irradiance totale reçue en un an par chaque site. Ainsi, nous pouvons établir un spectre solaire représentatif pour chaque site : pour chaque longueur d'onde du spectre solaire, une irradiance spectrale typique ($I_r(\lambda)$ en $\text{W/m}^2\text{nm}^{-1}$) est calculée en tenant compte de l'irradiance spectrale de tous les spectres disponibles pour un site (de 1 à n), pondérée par leurs contributions I/I_{an} respectives (équation (III-1)).

$$I_r(\lambda) = \sum_{1}^n I(\lambda)^1 \cdot \frac{I^1}{I_{an}} + \dots + I(\lambda)^{n-1} \cdot \frac{I^{n-1}}{I_{an}} + I(\lambda)^n \cdot \frac{I^n}{I_{an}} \quad (\text{III-1})$$

En appliquant l'équation (III-1) pour toutes les longueurs d'onde de la gamme solaire (280 – 2500 nm), un spectre solaire complet représentatif du suivi annuel est ainsi obtenu pour chaque site (Figure 44. La Table 10 reprend les principaux paramètres de modélisation et montre les résultats d'irradiance de chaque spectre solaire représentatif annuel obtenu. La quantité de vapeur d'eau et l'AOD de la table sont calculées, comme pour l'irradiance, en tenant compte de l'intervalle de temps entre deux points.

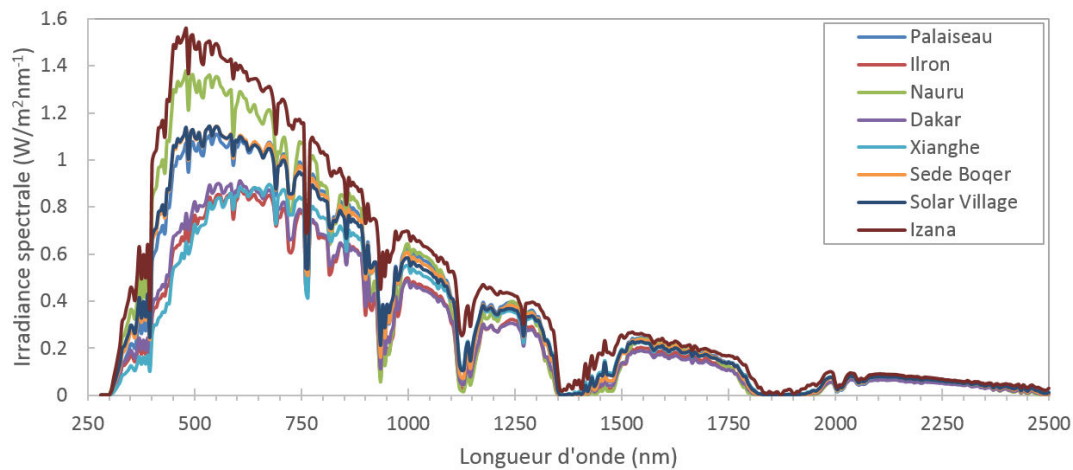


Figure 44 : Spectres solaires DC représentatifs des conditions annuelles pour les 8 sites [94]

Table 10 : Synthèse des spectres solaires DC issus du suivi annuel [94], [13]

Grandeur	Unité	Palaiseau	Ilorin	Nauru	Dakar	Xianghe	Sede Boqer	Solar Village	Izana
Altitude	m	156	350	7	0	32	480	768	2373
AM	-	2,29	1,75	1,72	1,81	2,07	1,92	1,85	1,89
Vapeur d'eau	atm/cm	1,44	1,638	4,17	1,323	1,01	1,28	1,18	0,37
AOD à 500 nm	-	0,16	0,846	0,09	0,196	0,53	0,2	0,24	0,04
Irradiance	W/m²	750	625	799	630	684	764	769	993

Nous remarquons que ces sites conduisent à des spectres solaires locaux bien plus démarqués que pour l'analyse précédente (spectres solaires moyens sur six sites, paragraphe 3.2, p. 98). En effet, le suivi de l'irradiance est cette fois réalisé sur l'année ce qui permet de mieux tenir compte de la variabilité des paramètres. Les quatre sites peu propices au CSP de Palaiseau, Ilorin, Dakar et Xianghe (Figure 43) correspondent aux irradiances spectrales les plus faibles. Comme pour le cas précédent de Paranal (2154 m), le spectre solaire du site en altitude d'Izana (2373 m) est le plus intense. Les spectres de type désertique de Sede Boqer et de Solar Village sont proches de celui de Mezaira. Étonnamment, le spectre solaire de Palaiseau (France) est également proche des spectres désertiques. Le facteur Air Mass moyen de Palaiseau est plus élevé que celui des sites désertiques, dû à sa latitude plus grande ($48,71^\circ$), tandis que sa turbidité (AOD) est plus faible. L'influence de ces deux facteurs se compense pour donner lieu à une irradiance équivalente. Malgré une altitude basse et beaucoup de vapeur d'eau, le site de Nauru (zone équatoriale) présente quant à lui une irradiance élevée comparativement aux autres sites (800 W/m^2), de par son facteur AM bas et sa turbidité faible.

Ainsi, les sites présentés ici ont des écarts importants d'irradiance spectrale (de par le choix de lieux plus disparates, dont certains sont incompatibles avec le CSP), ce qui nous permettra d'évaluer les performances des surfaces solaires (miroirs, vitres, absorbeurs) dans des conditions très différentes. De plus, l'utilisation de plusieurs milliers de spectres solaires par site pour établir un spectre solaire représentatif des variations annuelles nous permettra également d'évaluer les performances solaires moyennes annuelles de ces surfaces, et de les comparer avec la valeur obtenue en considérant uniquement le spectre solaire de référence ASTM G173-03 DC.

3.4. Conclusion sur les spectres solaires modélisés

A l'issue de cette étape de modélisation, nous disposons de trois jeux de spectres solaires. Tous donnent l'irradiance spectrale ($\text{W/m}^2\text{nm}^{-1}$) d'un rayonnement Direct et Circumsolaire (DC), c'est-à-dire le rayonnement réellement utilisable dans un système avec concentration, car le rayonnement diffus ne peut être concentré. Le premier est le spectre solaire de référence mondiale pour les applications solaires, le ASTM G173-03 DC (AM1.5). Le deuxième jeu de spectres solaires que nous avons modélisés concerne 6 lieux propices à l'implantation de centrales solaires à concentration répartis sur le globe. Ces spectres sont obtenus avec la même méthode que le spectre solaire de référence mondiale, par des moyennes des conditions atmosphériques locales, trouvées dans la base de données atmosphériques AERONET. Ils sont donc tous différents. Cependant nous remarquons qu'ils sont représentatifs de trois grandes familles (spectres d'altitude, spectres désertiques, spectres des zones intermédiaires). Le troisième jeu de spectres solaires à notre disposition a été calculé à partir d'une base de données du laboratoire PROMES qui contient plusieurs milliers de spectres solaires par site, pour un total de 8 sites. Pour chaque site nous avons reconstitué un spectre solaire représentatif issu du suivi annuel des conditions atmosphériques, en tenant compte des répartitions énergétiques de chacun des nombreux spectres de la base de données annuelle, à chaque longueur d'onde. Ces spectres solaires virtuels sont ainsi plus représentatifs d'un site donné que des spectres locaux moyens, mais leur obtention est bien plus chronophage.

IV. Conclusion du chapitre III

Nous avons détaillé dans ce chapitre la modélisation grâce au logiciel SMARTS-2 de divers spectres solaires, qui seront utilisés dans les chapitres IV à VI. Une étude de sensibilité des réponses du modèle, dans notre cas l'irradiance spectrale ($\text{W/m}^2/\text{nm}$) et l'irradiance associée (W/m^2), aux nombreux paramètres d'entrée a d'abord été réalisée, afin de déterminer quels étaient les paramètres les plus influents. La turbidité due aux aérosols, la quantité de vapeur d'eau et le facteur Air Mass (AM, épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement) ont ainsi été identifiés comme les paramètres prépondérants. Cette étude de sensibilité a permis de sélectionner, parmi les différentes bases de données atmosphériques, la base AERONET qui garantit une précision convenable sur la mesure de ces paramètres particuliers.

Deux principaux jeux de spectres solaires locaux (moyens ou avec suivi annuel) issus de conditions météorologiques et géographiques spécifiques pour un total de 14 sites répartis dans le monde, à comparer avec le spectre solaire de référence mondiale ASTM G173-03 DC (AM 1.5), ont été modélisés et intégrés, et sont désormais disponibles pour la suite de notre étude.

Grâce à cette base de données de spectres solaires incidents, nous allons en effet pouvoir étudier l'impact des conditions locales sur l'intégralité des revêtements solaires utilisés pour les trois fonctions (miroir, vitre et absorbeur) que l'on retrouve dans les collecteurs solaires, énoncées dans le chapitre I.

Ainsi, d'une part, il nous sera possible de décrire étape par étape la modification des spectres ayant été modifiés par ces fonctions dans un collecteur solaire. D'autre part, pour chacun des sites étudiés, il doit être possible d'optimiser les systèmes multicouches assurant ces trois fonctions optiques afin d'améliorer, au cas par cas, site par site, les technologies de collecteurs solaires proposées industriellement en les adaptant aux conditions locales d'implantation. Ainsi, après une analyse de la fonction optique d'intérêt et de l'exploration des solutions couches minces existantes et originales pour assurer cette fonction, les trois chapitres suivants traitent, sur la base d'exemples et pour chacune des trois fonctions optiques, de ces possibilités.

Chapitre IV

Fonction réflexion : couches minces réfléchissantes

I. Introduction du chapitre IV

Les surfaces réfléchissantes sont indispensables au bon fonctionnement de tous les collecteurs solaires à concentration, à l'exception de ceux utilisant des lentilles. Elles permettent, via une mise en forme particulière, de concentrer le rayonnement solaire linéairement (concentration 2D) ou ponctuellement (concentration 3D). Ce sont les surfaces les plus fréquemment rencontrées dans le CSP, certains collecteurs en utilisant même deux (voir chapitre I, Table 1, p.40). Ces surfaces réfléchissantes constituent l'un des postes d'investissement et de maintenance les plus importants d'une centrale solaire, et du champ solaire lui-même. L'objectif de ce chapitre est de montrer les différentes technologies de miroirs, basées sur des couches minces déposées en surface d'un matériau support, d'en comprendre le fonctionnement, d'identifier les limites de leurs performances solaires et de proposer des voies d'amélioration théoriques.

Pour atteindre ces objectifs, nous allons simuler la réflectance et optimiser des solutions couches minces réfléchissantes, qu'elles soient constituées de métaux (les plus répandues), ou d'autres solutions plus originales comme les multicouches diélectriques. En complément, nous étudierons l'impact de l'utilisation de couches de protection additionnelles et des sous-couches sur les performances, et comment limiter celui-ci. Puis nous aborderons par simulation l'effet possible de la rugosité des surfaces et interfaces, ainsi que des erreurs d'épaisseur, qui peuvent résulter de l'élaboration expérimentale des miroirs. Le cas des réflexions multiples rencontrées dans certains collecteurs est également investigué. Enfin, nous allons étudier les performances solaires des miroirs en fonction non plus du spectre solaire de référence, mais des spectres solaires locaux décrits dans le chapitre III.

II. Rappels sur la réflexion et les miroirs solaires

Introduisons quelques éléments de base concernant les miroirs solaires, souvent constitués d'un ensemble de couches minces, et leur fonction de réflectance. La loi de conservation de l'énergie nous dit que pour maximiser la réflectance d'un miroir solaire, il faut minimiser l'absorptance et la transmittance de la surface. La réflectance doit également être spéculaire et non diffuse, notions que nous allons expliciter dans ce paragraphe. Ces propriétés sont aisément accessibles en utilisant des métaux. La fonction réflexion peut néanmoins être aussi obtenue avec des matériaux diélectriques superposés en multicouches. Ces différents cas sont présentés dans la suite.

2.1. Type de réflexion : spéculaire / diffuse

D'après la loi de Snell-Descartes, tout rayon incident réfléchi sur une interface conserve son angle d'incidence. La réflexion est alors dite spéculaire (Figure 45, cas de gauche). Or, dans la réalité on observe des mécanismes plus complexes (cas de droite). En effet, en fonction de l'état de surface, de sa rugosité, d'une éventuelle oxydation ou de par la présence d'impuretés, une partie du rayonnement incident peut être réfléchi non spéculairement dans tout l'espace autour

du point d'incidence. La réflexion est alors dite diffuse : elle est répartie de façon homogène (cas central, surface lambertienne ou orthotrope) ou non (cas de droite). L'addition de la réflexion spéculaire et diffuse constitue la réflexion totale.

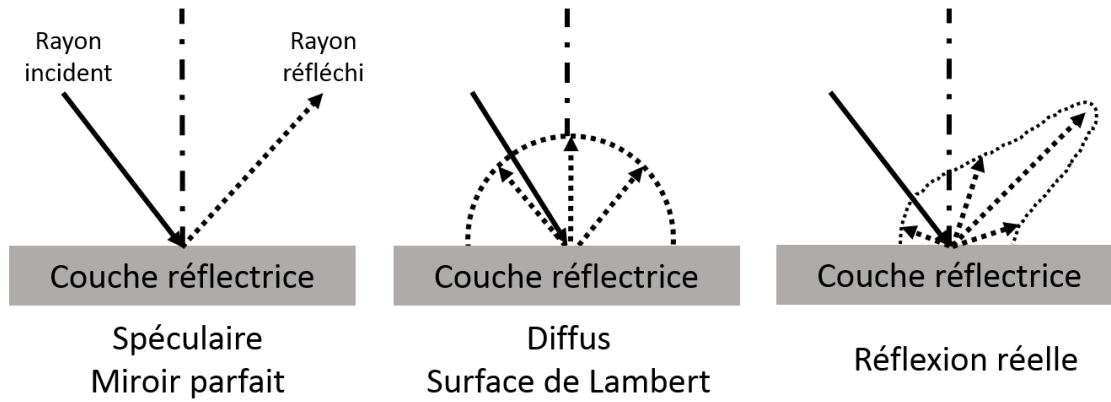


Figure 45 : A gauche une surface idéale avec une réflexion dite spéculaire, au milieu et à droite une surface réelle avec une réflexion diffuse (homogène ou inhomogène)

La réflexion diffuse est non focalisable par un système concentrateur. Pour la conception de miroirs solaires à concentration, la réflexion doit donc être spéculaire. Ainsi, assurer une réflexion spéculaire constitue l'une des principales problématiques des couches minces réfléchissantes à usage solaire concentré.

Diverses théories comme celles de Phong ou de Torrence et Sparrow [116], [117] permettent de décrire le comportement optique d'une surface vis-à-vis d'un rayon lumineux incident en fonction de l'état de surface. Issus des équations de Davies [117], [118], ces modèles permettent d'exprimer la réflexion spéculaire R_{SP} comme le rapport entre la densité de flux réfléchi spéculairement sur une surface (I_{SP}) et la densité de flux incidente (I_0), en fonction de la rugosité de la surface (σ_{ra}), de la longueur d'onde (λ) et de l'angle d'incidence (θ) de la lumière [117], [118] (équation (IV-1)).

$$R_{SP} = \frac{I_{SP}}{I_0} = e^{\frac{-[4\pi \cdot \sigma_{ra} \cdot \cos(\theta)]^2}{\lambda^2}} \quad (IV-1)$$

Pour ces études, la rugosité est définie comme « l'écart moyen arithmétique de la surface du matériau par rapport à la ligne de moyenne ». A partir de l'équation (IV-1) et en considérant le spectre solaire de référence (ASTM G173-03 DC) comme rayonnement incident, on peut tracer la part de réflexion spéculaire d'une surface en fonction de la longueur d'onde pour différentes rugosités (Figure 46). Nous remarquons que les faibles longueurs d'onde sont les plus impactées par l'augmentation de la rugosité, comme le laisse présager l'équation (IV-1). Plus la rugosité augmente, plus la plage de longueurs d'onde impactée s'élargit et plus la part de réflexion spéculaire diminue à ces longueurs d'onde. La part manquante du rayonnement (réflexion diffuse) est supposée être réfléchi selon le modèle de Lambert (Figure 45, cas central). En réalité on se rapprochera du cas de droite de la Figure 45, où une grande majorité des rayons sont réfléchis à un angle relativement proche de l'angle de réflexion spéculaire mais ne peuvent être collectés par un système à concentration.

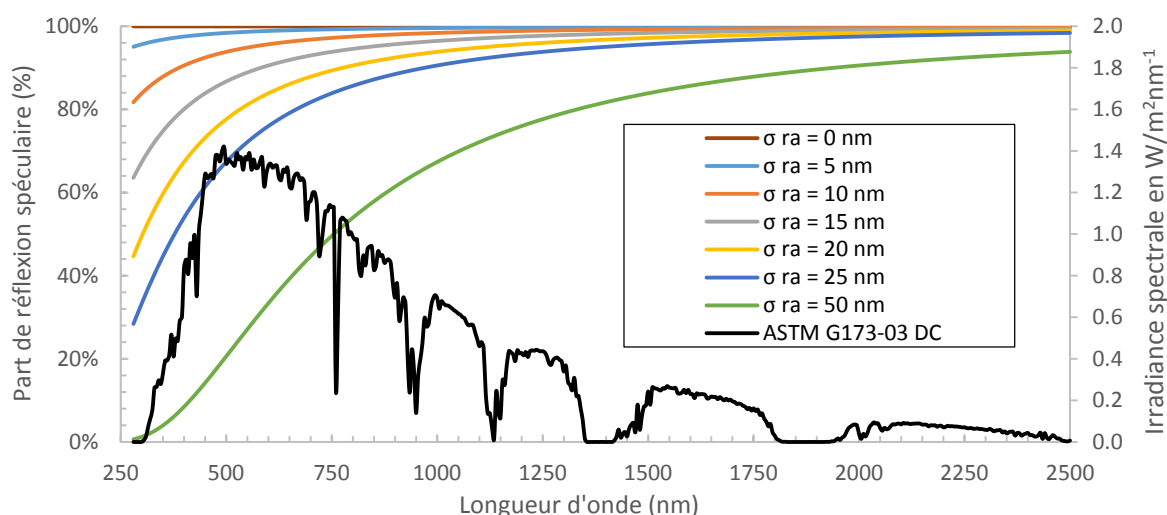


Figure 46 : Part de réflexion spéculaire dans la réflexion totale en fonction de la longueur d'onde incidente (angle d'incidence normal) pour différentes rugosités de surface

En pondérant le spectre de réflexion spéculaire (Figure 46) par le spectre solaire de référence ASTM G173-03 puis en l'intégrant en fonction de la longueur d'onde, nous obtenons la réflectance solaire spéculaire, c'est-à-dire la part de réflexion spéculaire dans la réflectance solaire totale. Celle-ci peut être exprimée en fonction de la rugosité de surface et de l'angle d'incidence de la lumière (Figure 47).

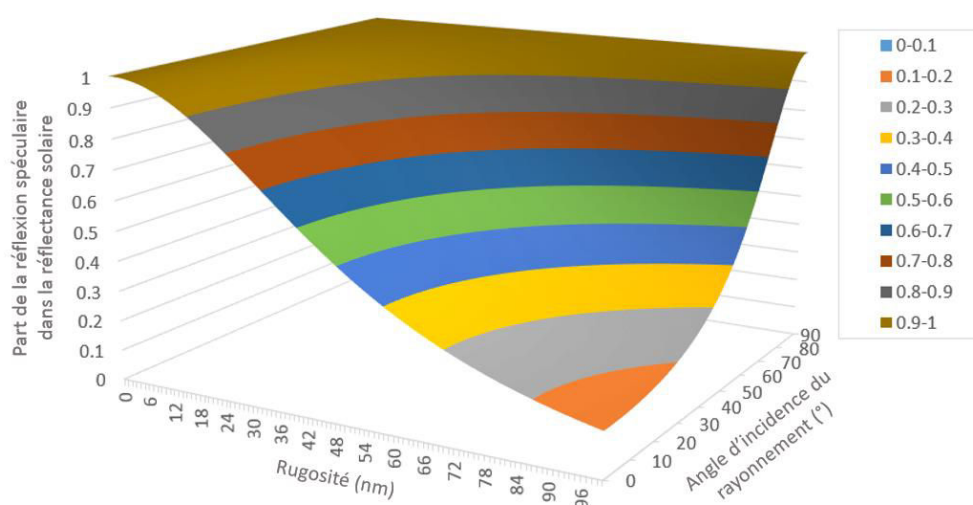


Figure 47 : Part de la réflexion spéculaire dans la réflectance solaire en fonction de l'angle d'incidence de la lumière et de la rugosité de surface

Ainsi, pour obtenir des réflectances solaires spéculaires élevées (> 99%) quel que soit l'angle d'incidence, il est indispensable de conserver une rugosité de surface très faible, typiquement inférieure à 5 nm. Une valeur inférieure à 2 nm serait optimale. Au-delà de 8 nm, la décroissance de la réflectance solaire spéculaire avec l'augmentation de la rugosité est rapide. Notons que la réflectance solaire spéculaire augmente avec l'angle d'incidence jusqu'à être parfaite (égale à 1) pour un angle d'incidence rasant (90°), indépendamment de la rugosité, mais ce cas n'est bien sûr pas favorable à la captation du rayonnement solaire.

2.2. Architecture des miroirs solaires

Plusieurs architectures en couches minces sont aujourd'hui développées pour l'obtention de miroirs solaires durables et performants. Elles sont commercialisées [119], [120] pour être utilisées dans les collecteurs à concentration thermique (CSP) mais aussi photovoltaïque (CPV) [52]. Les différents types de miroirs solaires peuvent être regroupés en cinq grandes familles, présentées sur la Figure 48 [121]. Par convention, le rayonnement incident rencontre d'abord la couche supérieure de l'empilement multicouche représenté.

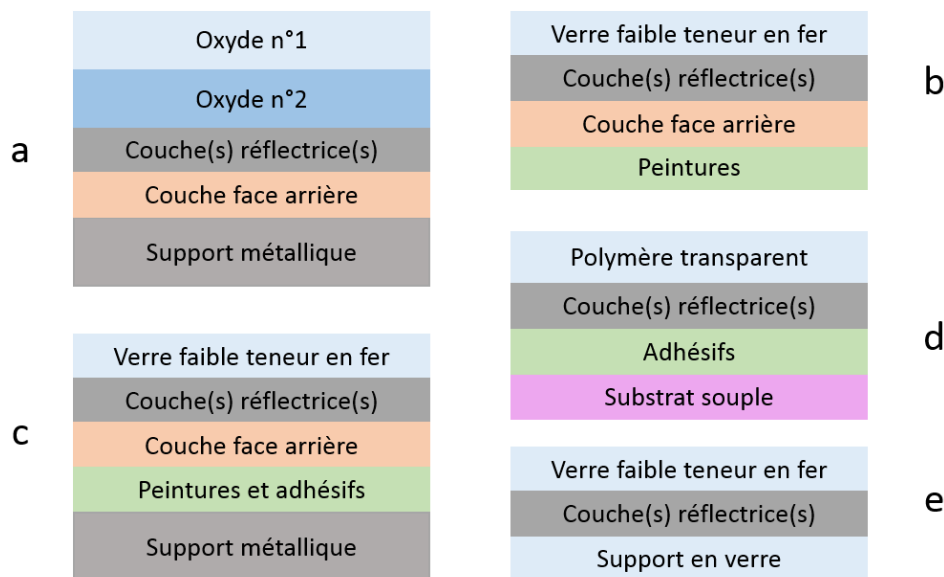


Figure 48: Principales architectures des miroirs solaires [121]

Tous ces miroirs solaires présentent des principes de base similaires : une ou plusieurs couche(s) réflectrice(s), une ou plusieurs couches de protection en face avant (oxydes et polymères transparents) et éventuellement des couches additionnelles (couche face arrière, peintures, adhésifs), le tout déposé sur (ou sous) un matériau support plus épais (substrat). Le support lui-même assure également un rôle de protection des couches [121], [122]. Pour fabriquer un miroir solaire, de nombreux types de matériaux (métaux, diélectriques ou polymères) sont utilisés, soit en couches très minces (quelques nm) soit en couches plus épaisses (μm ou mm). Cela permet aux miroirs solaires d'assurer trois fonctionnalités.

La fonctionnalité principale est de réfléchir le flux solaire incident. On cherche une réflectance maximale sur tout le spectre solaire (280 à 2500 nm, voire 4000 nm). Cette fonctionnalité est assurée par une ou plusieurs couches minces réfléchissantes, souvent composées de métaux, ayant chacune une épaisseur de l'ordre de la centaine de nanomètres. Elle peut être également composée d'un empilement de plusieurs couches minces diélectriques (SiO_2 et TiO_2 par exemple) [24].

La seconde fonctionnalité est de maintenir cette réflectance solaire élevée pendant toute la durée de fonctionnement de la centrale solaire, soit sur plusieurs décennies (durabilité) [65]. Pour cela il est indispensable de protéger la couche réfléchissante du

vieillessement (phénomènes d'oxydation, corrosion, abrasion, fissuration, délamination, dommages dus à des impacts, etc. [65]). Les miroirs sont donc de type "sandwich", protégeant ainsi les deux côtés de la (des) couche(s) réflectrice(s) :

- La protection en face avant est le premier matériau rencontré par le rayonnement. Il doit donc être transparent. Plusieurs matériaux sont disponibles : des verres, en support rigide (Figure 48, b) ou fin (Figure 48, e), des couches minces d'oxydes transparents (Figure 48, a) ou de polymères (Figure 48, d).
- La seconde couche de protection est située à l'arrière de la couche réfléchissante. Elle ne participe donc pas directement à la réflexion du rayonnement solaire. Plusieurs architectures utilisent une couche mince dite « de face arrière » (Figure 48, a, b et c). Cette dernière est le plus souvent constituée de cuivre, pour les couches réfléchissantes à base d'argent par exemple. Cette couche face arrière permet de ralentir la corrosion de l'argent en jouant le rôle d'une anode sacrificielle. Elle permet également d'éviter que les UV, non entièrement réfléchis ou absorbés par l'argent, n'atteignent les couches adhésives et les peintures situées en dessous de la couche de cuivre. En effet, ces matières polymères peuvent être dégradées par les UV.

Dans certains cas, le sandwich peut être terminé par la pose arrière d'un support rigide métallique ou verre (Figure 48, e). Pour certaines architectures le support rigide (métallique ou souple) sert directement de substrat sur lequel les couches sont déposées, et la couche finale protectrice est transparente (Figure 48, c et d).

La troisième fonctionnalité concerne la concentration solaire, par une mise en forme adéquate du miroir. Cette mise en forme dépend du type de collecteur solaire souhaité : plan ou quasi-plan, cylindrique, parabolique, etc. Elle est assurée par un support rigide, qui peut être métallique (Figure 48, a et c) ou en verre (Figure 48, b et e), voire même par un support souple (Figure 48, d).

Le dépôt des couches réfléchissantes s'effectue principalement par des méthodes sous vide, comme la PVD (Physical Vapor Deposition, par exemple pulvérisation cathodique) [52], [65]. Les couches non métalliques peuvent être réalisées par PVD réactive (pulvérisation en présence de précurseurs gazeux contenant oxygène, carbone, azote, etc.) ou par PACVD (Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition).

III. Modélisation de couches réflectrices

Suite à la description des grands types de structures existantes, nous allons analyser les performances d'exemples de couches réflectrices pour miroirs solaires, à base de métaux puis à base de diélectriques. Le but est ici d'identifier quelques voies d'amélioration des performances. Pour modéliser et optimiser la structure des divers types de couches réflectrices présentés ici, nous utilisons le code de simulation et d'optimisation basé sur le calcul des coefficients de Fresnel, décrit dans le chapitre II (paragraphe 3.1 p.72). Le paramètre à maximiser est ici la

réflectance solaire (fonction coût recherchée dans ce cas). Pour ce paragraphe, nous utiliserons en entrée le spectre solaire incident de référence mondiale ASTM G173-03 Direct et Circumsolaire (DC).

3.1. Couches réflectrices métalliques

Les métaux peuvent constituer d'excellents miroirs car ils sont très réflecteurs grâce à leurs indices de réfraction réels (n) souvent inférieurs à 1. Leurs coefficients d'extinction (k) très élevés leur confèrent également une grande opacité.

Nous avons tout d'abord étudié le comportement en réflexion de plusieurs métaux en les considérant comme des matériaux parfaits sans rugosité. Nous nous intéressons donc ici à leur réflectivité spectrale $\rho_s(\lambda)$ (voir chapitre I, paragraphe 5.1, p.49), c'est-à-dire la propriété intrinsèque du matériau. Dix métaux ont été considérés : les métaux les plus couramment utilisés en couches réflectrices, l'argent (Ag), le cuivre (Cu), l'or (Au) et l'aluminium (Al), auxquels nous avons ajouté six autres métaux (Cr, Mo, Ni, Ti, V et W) fréquemment rencontrés dans la bibliographie. Les indices de réfraction complexes nécessaires aux calculs sont disponibles dans la bibliographie [101], [123], [124].

La réflectivité spectrale calculée pour ces métaux est présentée sur la Figure 49. Nous observons que les meilleurs réflecteurs sont, dans l'ordre décroissant, l'argent, l'aluminium, le cuivre et l'or. Ces quatre métaux sont en effet hautement réflecteurs dans le visible et dans l'infrarouge. Hormis l'aluminium, les métaux ne sont par contre pas de bons réflecteurs pour les très courtes longueurs d'onde (inférieures à 350 nm).

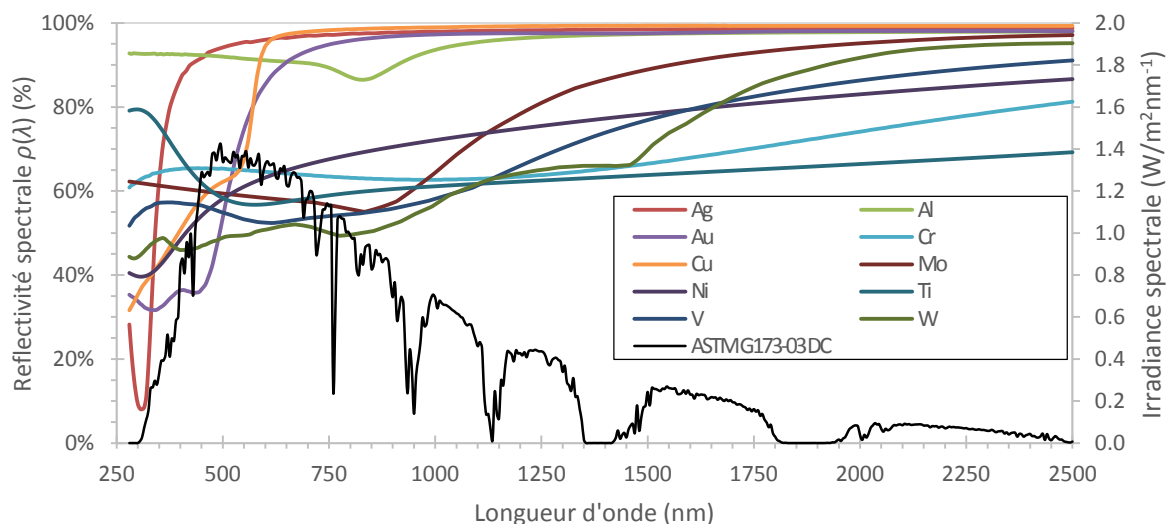


Figure 49 : Réflectivité spectrale de dix métaux

Pour le reste du spectre solaire, l'aluminium et l'argent sont très réflecteurs (réflectivité supérieure à 90%), avec un net avantage pour l'argent, notamment de 500 à 1000 nm. Le cuivre et l'or sont quant à eux très réflecteurs seulement à partir de 600 nm. Ils absorbent en partie dans le visible. Ceci leur confère leur couleur caractéristique.

La Table 11 présente la réflectivité solaire des dix métaux étudiés, calculée à partir des spectres de réflectivité (Figure 49) selon l'équation (I-5) (voir chapitre II, §5.2, p.50). Elle confirme que l'argent est le meilleur réflecteur solaire (95,5%). L'aluminium arrive second (92,2%). Le cuivre et l'or sont respectivement troisième et quatrième du fait de leur moins bonne réflectivité spectrale dans le visible. Ils sont toutefois très réfléchissants dans le proche infrarouge et l'infrarouge et parfaitement opaques dès les faibles épaisseurs (Figure 49).

Table 11 : Réflectivité solaire ρ_s de dix métaux

Métal	Ag	Al	Au	Cr	Cu
ρ_s	95,50%	92,18%	82,67%	64,79%	87,53%
Métal	V	Mo	W	Ni	Ti
ρ_s	59,16%	64,79%	55,54%	66,60%	60,75%

L'aluminium et l'argent sont donc les matériaux les plus utilisés de nos jours pour fabriquer des miroirs solaires, du fait de leurs bonnes performances solaires [125]. Nous allons nous intéresser à ces deux métaux dans la suite du paragraphe.

Monocouches réflectrices argent

Afin de modéliser des miroirs en argent, nous avons tout d'abord sélectionné un jeu d'indices de réfraction complexes parmi ceux trouvés dans la bibliographie. La Figure 50 présente les calculs de réflectance spectrale correspondants. Il s'agit cette fois de réflectance et non de réflectivité, car les indices optiques utilisés pour le calcul ont été mesurés sur des surfaces réelles (non parfaites).

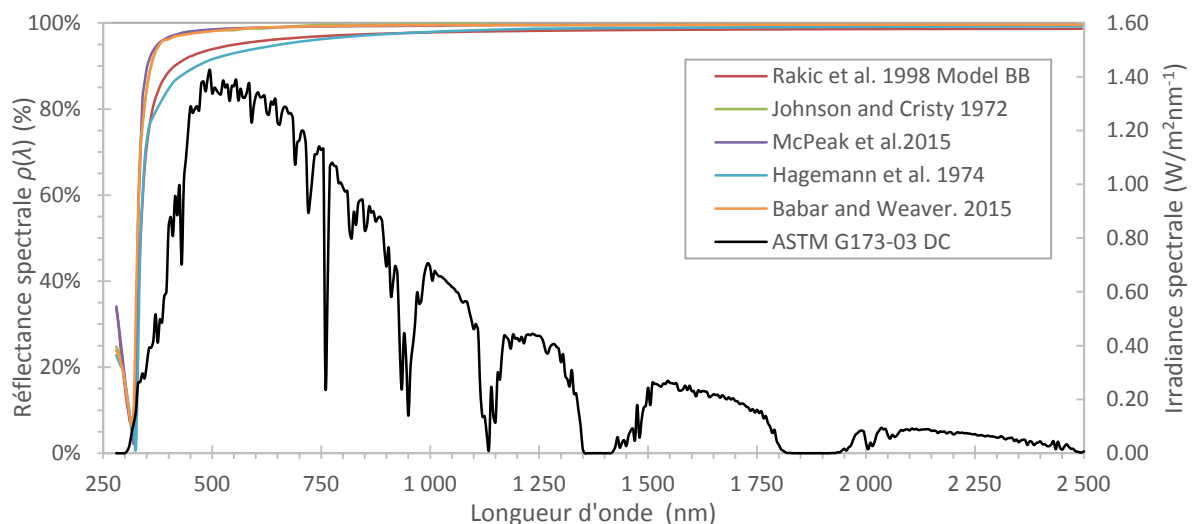


Figure 50 : Réflectance spectrale de l'argent calculée à partir de divers jeux d'indices de réfraction complexes trouvés dans la bibliographie

La Figure 50 indique que les courbes de réflectance obtenues à partir des données des différents auteurs sont similaires : l'argent est faiblement réflecteur dans l'UV (280 à 350 nm) et hautement réflecteur dans le reste du spectre solaire. Au vu de la figure, nous pouvons séparer les données bibliographiques en deux groupes distincts.

- Les études de Johnson and Cristy [126], McPeak [101], Babar and Weaver [127] sont très similaires et amènent à une réflectance solaire moyenne de 98,5% ($\pm 0,1\%$).
- Les études de Rakic [123] (modèle Brendel-Bormann) et Hagemann [128] donnent respectivement lieu à une réflectance solaire de 95,5% et 94,5%. La réflectance spectrale dans le visible est dans ce cas plus faible que pour le groupe précédent (Figure 50).

Cette différence d'environ 3% de réflectance solaire entre les deux groupes s'explique par des différences dans les modes d'élaboration des couches d'argent et donc par la nature du matériau étudié. Par exemple, McPeak [101] s'intéresse à des couches de type Ag cristallisé (111). Ses indices de réfraction complexes sont représentatifs de conditions de dépôt d'argent très spécifiques (dépôt sur wafer Si de couches d'épaisseur > 300 nm, vitesse de dépôt de 50 à 150 Å/s, pression très faible 10^{-8} Torr). Ces conditions sont très éloignées des conditions d'élaboration industrielles. Nous préférons donc utiliser les indices de réfraction complexes de Rakic [123], établis selon une modélisation théorique utilisant le modèle de Brendel-Bormann validée par des mesures sur des couches minces d'argent élaborées dans des conditions plus proches de celles rencontrées dans l'industrie des miroirs.

A partir des indices de réfraction sélectionnés, nous avons effectué des simulations de réflectance et de transmittance solaires en considérant des couches uniques (monocouches) d'argent déposées sur deux substrats différents (verre et fer). Nous avons également comparé ces valeurs à celles obtenues avec une couche mince d'argent isolée, considérée alors comme « déposée » sur un substrat d'air (milieu semi-infini). Les résultats sont montrés sur la Figure 51 en fonction de l'épaisseur de la couche d'argent. La réflectance et la transmittance solaires sont dépendantes de l'épaisseur de la couche déposée et atteignent respectivement un maximum et un minimum au-delà d'une épaisseur de 80 nm. Au-delà de cette épaisseur, le matériau du substrat n'intervient plus de façon sensible sur les propriétés solaires puisque les propriétés solaires sont identiques pour la couche d'Ag isolée et les couches sur substrats fer et verre. Il est donc possible de concevoir de bons miroirs argent indépendamment du substrat utilisé (verre ou autre métal). La précision sur l'épaisseur de dépôt expérimental du métal n'est pas non plus capitale pour les miroirs, tant qu'une épaisseur minimale est déposée.

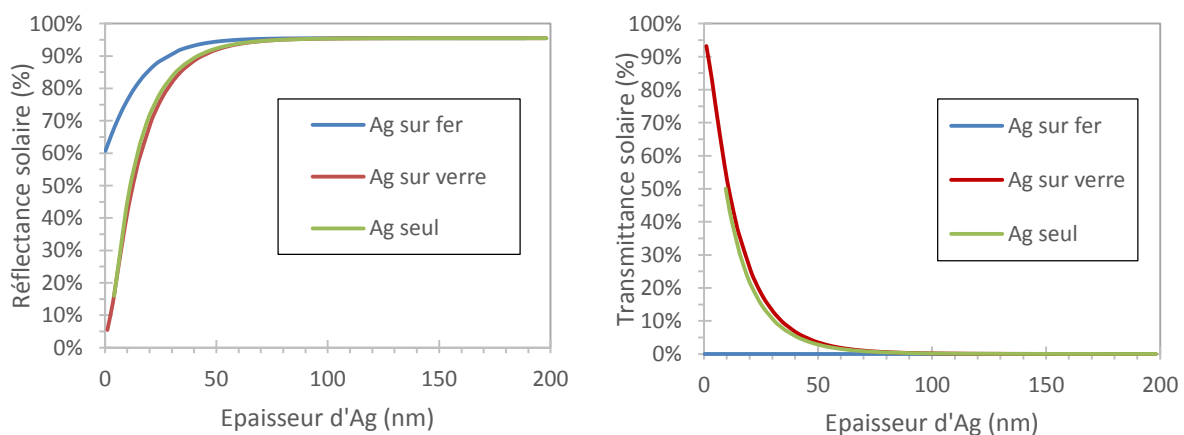


Figure 51 : Réflectance et transmittance solaires d'une couche d'Ag (calculée à partir des indices de Rakic [123]) en fonction de son épaisseur pour différents substrats

Dans la pratique, la bibliographie mentionne souvent des couches argent de 150 nm [122]. En effet, l'argent n'étant pas parfaitement opaque (transmittance spectrale $T \neq 0$ dans les UV, de 200 à 380 nm), il est nécessaire de dépasser une épaisseur limite pour réduire la transmittance solaire correspondante. On obtient en effet une transmittance solaire de 0,16% pour 100 nm et 0,03% pour 150 nm (Figure 51). Cette légère transmittance justifie l'usage des couches de face arrière, souvent en cuivre, pour les miroirs argent (Figure 48). La couche de face arrière bloque alors la transmission résiduelle en l'absorbant ou en la réfléchissant, afin de protéger les couches inférieures (peintures sensibles aux UV).

Bien que l'argent soit un excellent candidat pour les miroirs solaires de par ses performances élevées, il est intéressant d'étudier des alternatives aux miroirs en argent, du fait du coût élevé et de la rareté de ce matériau [129]. C'est ce que nous allons faire dans la suite du paragraphe.

Monocouches réflectrices aluminium

L'aluminium est le second métal le plus utilisé dans les miroirs solaires du fait de son faible coût. Ses propriétés optiques sont également bien connues. Quatre études donnant leurs indices de réfraction complexes ont été comparées ici : nous retrouvons les données de Rakic [123], Hagemann [128] et McPeak [101], auxquelles s'ajoutent celles de Ordal [124]. La Figure 52 illustre les réflectances spectrales correspondantes, que nous avons calculées à partir des indices de réfraction complexes grâce au code présenté dans le chapitre II.

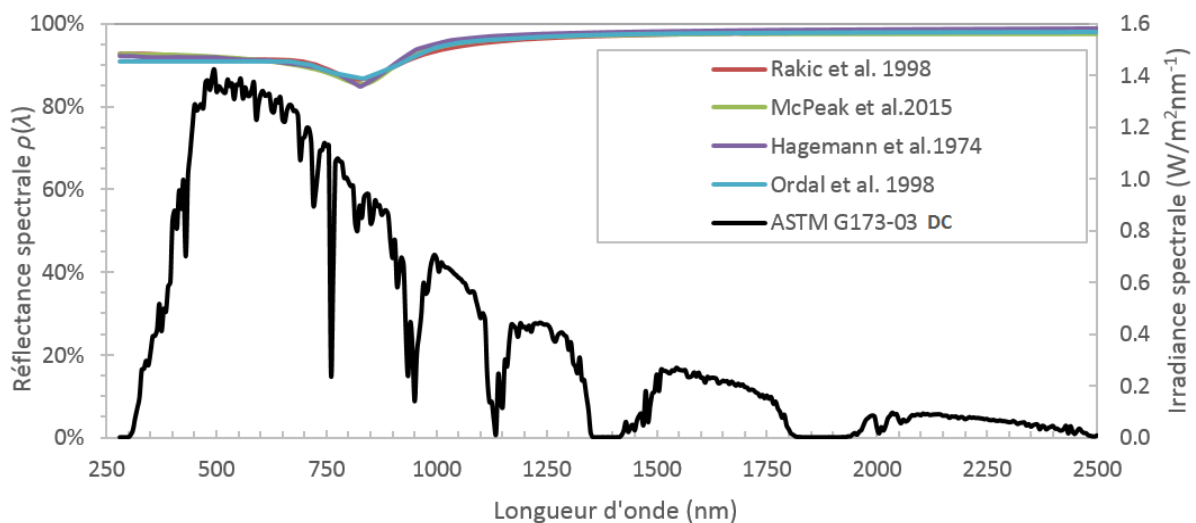


Figure 52 : Réflectance spectrale de l'aluminium calculée à partir de divers jeux d'indices de réfraction complexes trouvés dans la bibliographie

Contrairement au cas de l'argent, les réflectances spectrales calculées à partir des indices rapportés par les différents auteurs sont très similaires. Nous avons choisi d'utiliser cette fois encore les données de Rakic [123]. En conséquence, les réflectances solaires de l'aluminium, déduites des spectres de réflectance (Figure 52, sont très similaires d'un auteur à l'autre (pour un substrat et une épaisseur de couche donnés), autour de 92,2%, avec un écart entre les valeurs minimum et maximum de 0,39%.

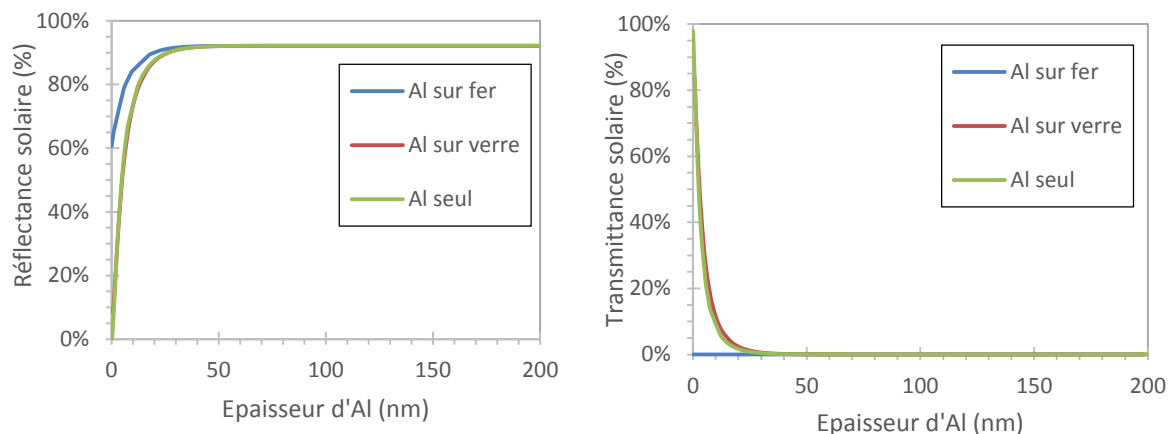


Figure 53 : Réflectance et transmittance solaires de monocouches d'Al (calculée à partir des indices de Rakic [123]) en fonction de l'épaisseur de la couche et de la nature du substrat

Les courbes de réflectance et de transmittance solaires de couches d'aluminium (Figure 53), en fonction de l'épaisseur de la couche et pour différents substrats, ont des évolutions similaires à celles de l'argent (Figure 51). La réflectance et la transmittance solaires sont par contre constantes dès 50 nm d'épaisseur de couche déposée dans le cas de l'aluminium. A cette épaisseur, l'opacité de l'aluminium est quasiment totale et permet également de se passer de couche de face arrière, les UV n'étant pas transmis. A titre de comparaison, la transmittance solaire d'une couche de 100 nm d'aluminium est de 5.10^{-7} contre 0,16% (soit $1,6.10^{-3}$) pour l'argent.

L'aluminium est un matériau relativement bien adapté pour fabriquer des miroirs solaires et présente l'intérêt d'être peu onéreux comparativement à l'argent. Cependant ses performances optiques sont moins bonnes que celles de l'argent. Dans la suite nous proposons d'explorer des solutions alliant les avantages de ces deux matériaux. L'association avec d'autres métaux est également évoquée.

Multicouches réflectrices métalliques

Bien que moins performants optiquement, des métaux comme l'aluminium, le chrome ou le cuivre sont plus abondants et moins coûteux que l'argent [130]. Nous avons donc envisagé des miroirs originaux de type multicouches où d'autres matériaux sont intercalés avec l'argent. Nous avons ainsi modélisé des couches réflectrices multicouches métalliques (Figure 54), afin de tenter d'obtenir une réflectance solaire élevée tout en réduisant la quantité d'argent nécessaire. Nous ne montrons pas ici des empilements de plus de deux couches, car les couches métalliques deviennent opaques dès les faibles épaisseurs (50 nm pour l'aluminium par exemple), masquant ainsi rapidement les couches inférieures. Des empilements de plus de deux couches minces métalliques n'offrent donc pas de solution plus performante que celles présentées ici (voir annexe §4.1, p.290).

La Table 12 synthétise les résultats les plus marquants parmi les diverses structures de miroirs bicouches simulées, en faisant varier la nature et l'épaisseur des métaux déposés sur un substrat de fer. L'argent, l'aluminium, le cuivre, le chrome et/ou l'or sont considérés pour le bicouche. A titre de comparaison, des monocouches d'argent et d'aluminium sont également

étudiées. Dans la Table 12, la couche n°1 est la couche inférieure (côté substrat) et la couche n°2 est la couche supérieure (côté soleil) (Figure 54). Les épaisseurs de ces deux couches ont été optimisées grâce au code COPS présenté dans le chapitre II (§3.2, p.75), afin de maximiser la réflectance solaire. Les performances solaires correspondantes (réflectance, transmittance et absorptance solaires) sont rapportées dans la Table 12. Les valeurs en vert gras correspondent à la meilleure réflectance solaire observée.

Table 12 : Performances solaires simulées de différents miroirs multicouches métalliques

Cas n°	Couche n°1	Couche n°2	Épaisseur n°1	Épaisseur n°2	R_s	T_s	A_s
1	Al	-	125,7 nm	-	92,18%	0,00%	7,82%
2	Ag	-	123,4 nm	-	95,50%	0,00%	4,50%
3	Al	Ag	132,7 nm	39,0 nm	95,85%	0,00%	4,15%
4	Ag	Al	123,1 nm	0,0 nm	95,50%	0,00%	4,50%
5	Au	Ag	78,1 nm	83,4 nm	95,52%	0,00%	4,48%
6	Cr	Ag	47,9 nm	118,9 nm	95,50%	0,00%	4,50%
7	Cu	Ag	118,2 nm	110,2 nm	95,50%	0,00%	4,50%

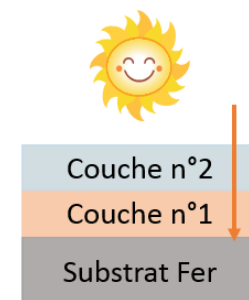


Figure 54 : Schéma de l'empilement

Il ressort tout d'abord de cette étude qu'une couche superficielle (couche n°2) en argent soit nécessaire pour garantir une réflectance solaire élevée. Ajouter une couche superficielle d'aluminium sur une couche d'argent est inutile, l'optimisation suggérant de la supprimer (Table 12, cas n°4). Les résultats montrent également qu'utiliser une sous-couche (couche n°1) constituée d'un autre métal (Table 12, cas n° 5-7) que l'aluminium (cas n°3) ne permet pas d'augmenter notablement la réflectance solaire par rapport à une couche d'argent seul.

On note enfin qu'un miroir composé d'une couche superficielle d'argent déposée sur une sous-couche d'aluminium (Table 12, cas n°3) présente un fort intérêt. D'une part, par rapport à un miroir composé d'une seule couche d'argent ($R_s = 95,50\%$), la réflectance solaire est légèrement accrue (+0,35%) pour le bicouche Al/Ag ($R_s = 95,85\%$). D'autre part, dans ce bicouche l'épaisseur de la couche d'argent nécessaire est trois fois moins importante (40 nm) qu'en solution monocouche (120 nm), ce qui permet d'envisager des économies de matière et une réduction des coûts de fabrication.

L'augmentation observée de la réflectance solaire s'explique par une meilleure réflectance spectrale du système bicouche Al/Ag dans le domaine des courtes longueurs d'onde par rapport à l'argent seul (Figure 55). La couche d'argent étant de faible épaisseur, les longueurs d'onde non réfléchies par l'argent sont transmises à l'aluminium situé en dessous par semi-transparence. L'aluminium réfléchit quant à lui ces longueurs d'onde, qui retraversent la couche d'argent et sont donc réfléchies par le système complet (voir annexe §4.1, p.290). L'épaisseur d'argent doit cependant rester suffisamment importante pour conserver une réflectance spectrale supérieure à celle de l'aluminium aux autres longueurs d'onde (au-delà de 425 nm).

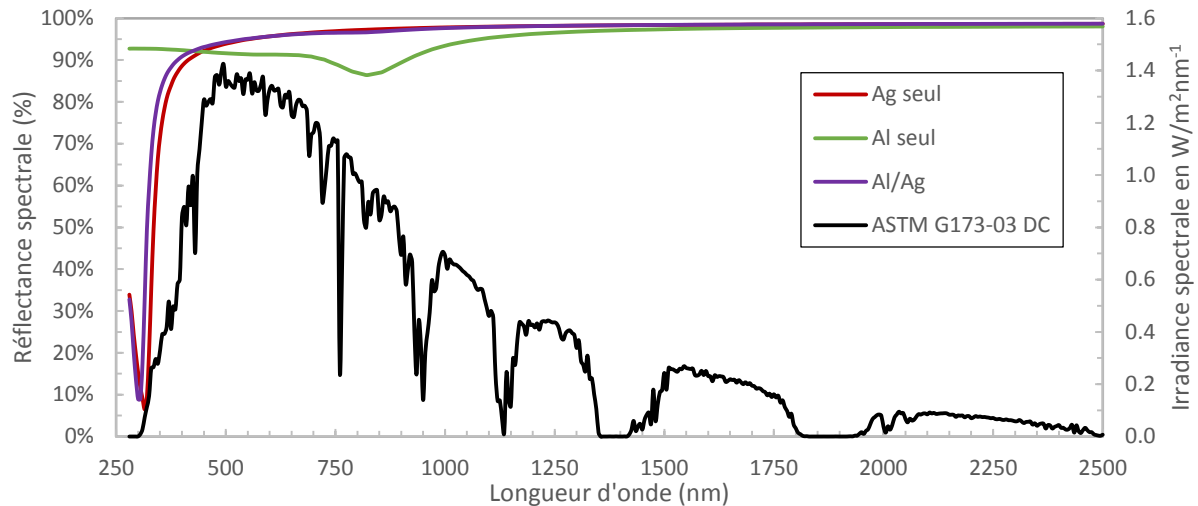


Figure 55 : Réflectance spectrale d'un miroir multicouches métallique Al/Ag, comparée à celle des monocouches prises séparément

Conclusion sur les couches réflectrices métalliques

Les couches réflectrices métalliques utilisées en couches minces sont un excellent moyen d'assurer une réflectance solaire élevée, supérieure à 90%. L'argent et l'aluminium sont les deux meilleurs métaux pour réfléchir un spectre solaire, avec respectivement une réflectance solaire de 95,5% et 92,2%. Pour cette raison ces matériaux sont déjà utilisés dans les miroirs des centrales solaires. Ces deux métaux permettent une mise en place très simple du miroir, puisqu'une simple monocouche d'une centaine de nanomètres d'épaisseur permet d'obtenir des performances maximales. En utilisant conjointement une faible épaisseur (≈ 40 nm) d'argent sur une sous-couche d'aluminium, il est envisageable d'augmenter la réflectance solaire de 0,35% tout en réalisant des économies de matière précieuse. De nombreuses autres solutions basées sur les couches minces métalliques (mono- ou bicouches d'autres métaux, multicouches périodiques, multicouches à plus de deux couches, composites métal-métal, voir annexe §4.1, p.290) ont été testées dans cette étude mais n'ont pas mené à une amélioration des performances. Il est par contre envisageable d'utiliser d'autres types de matériaux, seuls ou en combinaison avec des métaux, pour atteindre des performances solaires élevées. C'est ce que nous allons étudier dans la suite.

3.2. Couches réflectrices diélectriques multicouches périodiques (réflecteurs de Bragg)

Bien que les couches réflectrices métalliques représentent la grande majorité des couches réflectrices des miroirs solaires, grâce aux propriétés optiques des métaux, il existe également des miroirs utilisant des couches non métalliques, c'est-à-dire diélectriques. Nous avons étudié leur potentiel pour des applications solaires. Notons qu'un diélectrique possède une réflectance solaire faible (quelques pourcents). En revanche l'assemblage de plusieurs couches minces dans une architecture multicouche peut permettre d'obtenir la fonction de réflectance solaire. On parle dans ce cas de miroirs de Bragg [131].

Un réflecteur de Bragg réparti (abrégé DBR : Distributed Bragg Reflector) est un dispositif optique pouvant atteindre une réflectivité très élevée (de l'ordre de 99,9%) mais sur un domaine spectral généralement réduit [131]. Ce type de miroir est très utilisé dans les optiques lasers et les interféromètres. Des réflectances record sont atteintes en utilisant des empilements multicouches périodiques, c'est-à-dire une succession (ou période, ici notée Λ) de deux couches minces diélectriques d'épaisseurs fixes (d_1 et d_2), répétées un nombre important de fois (noté Nb), pour atteindre une épaisseur totale $d_{DBR} = Nb \Lambda$, comme indiqué sur la Figure 56 [131].

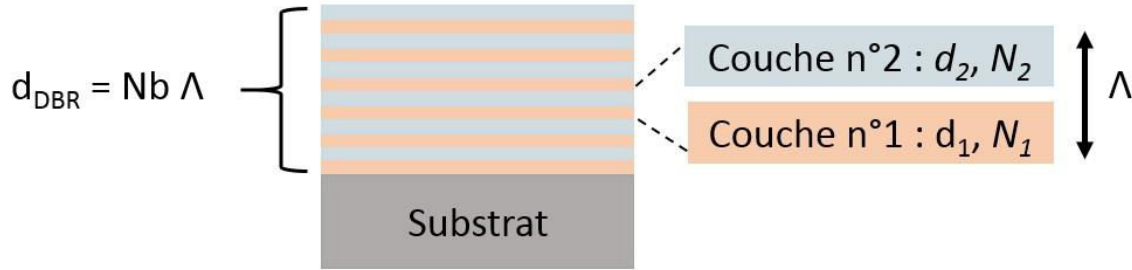


Figure 56 : Architecture d'un réflecteur de Bragg réparti (DBR)

Ce type d'empilement périodique crée des interférences constructives par lame quart d'onde (voir chapitre V, §2.2 p.156), menant à une réflectance élevée. Pour cela, des contrastes d'indice de réfraction réels entre les deux matériaux du bicouche périodique sont nécessaires ($n_2 > n_1$). Le coefficient d'extinction k des matériaux de l'empilement doit être faible pour permettre au rayonnement d'être transmis profondément dans le système multicouche, d'où le choix de diélectriques transparents. La réflectivité monochromatique $\rho(\lambda)$ d'un DBR se calcule en fonction du contraste d'indices de réfraction des deux matériaux $n_1(\lambda)$ et $n_2(\lambda)$, des indices de l'environnement $n_0(\lambda)$ et du substrat $n_s(\lambda)$, et du nombre de périodes du motif (Nb), selon l'expression (IV-2).

$$\rho(\lambda) = \left[\frac{n_0(\lambda)[n_2(\lambda)]^{2Nb} - n_s(\lambda)[n_1(\lambda)]^{2Nb}}{n_0(\lambda)[n_2(\lambda)]^{2Nb} + n_s(\lambda)[n_1(\lambda)]^{2Nb}} \right]^2 \quad (IV-2)$$

Les bicouches sont des alternances de matériaux à bas indice de réfraction (n compris entre 1,38 et 1,75) comme les fluorites (MgF_2 , CaF_2 , etc.), SiO_2 ou Al_2O_3 , et à fort indice de réfraction (n compris entre 2,1 et 3,9) comme Ta_2O_5 , ZnS , TiO_2 ou les arsenides ($AlAs$, $GaAs$, etc.). Plus la différence entre les indices de réfraction des deux matériaux ($n_2 - n_1$) est importante, plus le miroir sera réfléchissant sur un large domaine spectral $\Delta\lambda$ autour d'une longueur d'onde centrale λ_0 (équation (IV-3)).

$$\Delta\lambda \approx \lambda_0 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \arcsin \left(\frac{n_2(\lambda_0) - n_1(\lambda_0)}{n_2(\lambda_0) + n_1(\lambda_0)} \right) \quad (IV-3)$$

Nous avons simulé la réflectance spectrale d'un DBR composé de différents matériaux diélectriques. Par souci de lisibilité, nous ne présentons ici qu'un seul exemple : un DBR $GaAs/MgF_2$, sélectionné pour la forte différence d'indice de réfraction entre le $GaAs$ (n à

600 nm = 3,9) et le MgF_2 (n à 600 nm = 1,38), ce qui permet d'obtenir un large domaine théorique de forte réflectivité, $\Delta\lambda = 380$ nm, centré autour de 600 nm. Les indices de réfraction complexes de ces matériaux sont disponibles dans la littérature [132], [133]. La Figure 57 présente la réflectance spectrale d'un tel miroir pour un spectre solaire complet et un multicouche de 10 périodes (20 couches), déposé sur un substrat en verre BK7[®]. Les épaisseurs sont optimisées grâce à notre code (voir chapitre II) afin d'obtenir un maximum de réflexion à 600 nm : 108 nm pour les couches MgF_2 et 43 nm pour les couches GaAs.

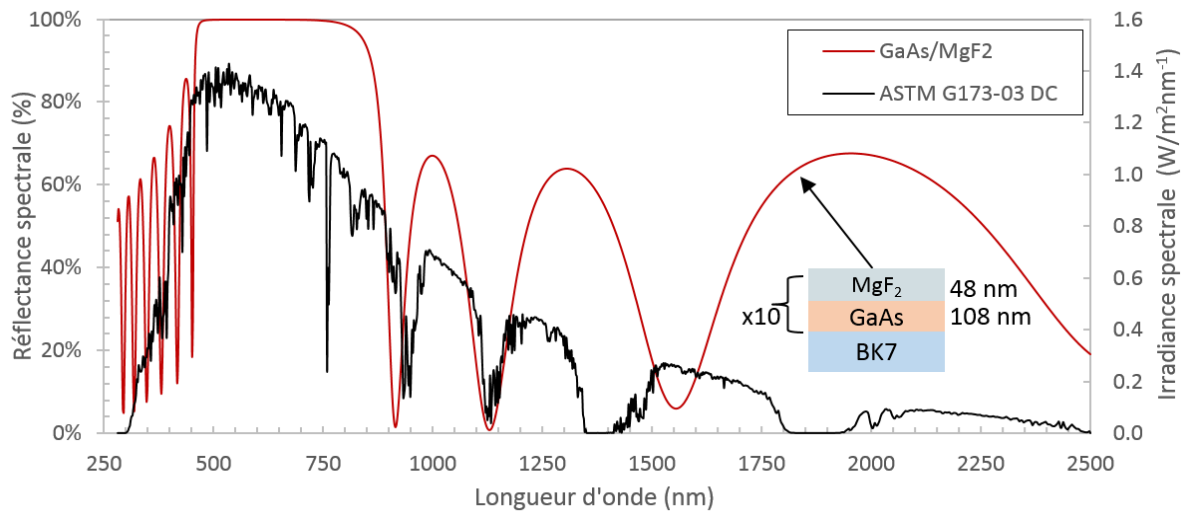


Figure 57 : Réflectance d'un DBR GaAs/MgF₂ pour $N_b = 10$ déposé sur verre BK7[®]

Pour ce type de miroir, la réflectance spectrale est uniquement due aux interférences constructives, qui donnent le plateau de réflectance supérieur à 99,99% sur le domaine d'utilisation (ici de 475 nm à 800 nm). Au-delà, la réflectance suit les variations des interférences (destructives ou constructives), lui donnant un aspect sinusoïdal. Au total, la réflectance solaire est de 74,6% pour cet exemple.

Pour obtenir des valeurs de réflectance solaire égales ou supérieures à un miroir métallique Al ou Ag ($R_s > 92\%$), il serait nécessaire d'avoir un très large domaine de forte réflectance $\Delta\lambda$ et donc d'utiliser au moins un matériau avec un indice de réfraction très élevé ($n > 10$, indice théorique juste utilisé pour l'étude). La Figure 58 présente l'étendue théorique calculée de la zone de forte réflexion $\Delta\lambda$ en fonction des indices de réfraction (n_1 et n_2) des deux matériaux (équation IV-3) (réflexion centrée autour de 600 nm). Chaque courbe correspond à une valeur de l'indice de réfraction le plus bas (n_1), l'abscisse représente l'indice de réfraction le plus haut (n_2).

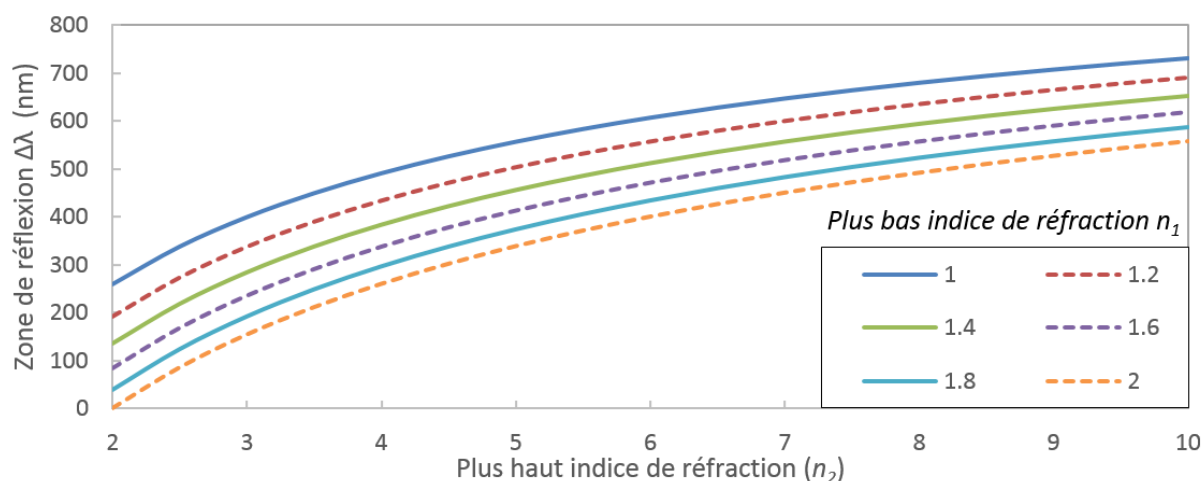


Figure 58 : Etendue de la zone de réflexion d'un miroir de Bragg ($\Delta\lambda$) autour de 600 nm en fonction des indices de réfraction n_1 et n_2 des deux matériaux utilisés, selon l'équation IV-3

Nous constatons que même en utilisant des matériaux avec un écart élevé d'indice ($n_1 = 1$, $n_2 = 10$), l'étendue de la zone de réflexion $\Delta\lambda$ ne peut dépasser 730 nm. De plus, un tel contraste d'indice de réfraction serait utopique, le plus bas indice de réfraction que nous ayons observé dans la bibliographie est le MgF_2 ($n = 1,38$ à 600 nm) tandis que le plus haut est le GaAs ($n = 3,9$ à 600 nm). Il est donc impossible d'obtenir une forte réflectance spectrale sur un spectre solaire complet de 280 à 2500 nm (étendue de 2220 nm). En conséquence, il n'est pas possible d'obtenir une bonne réflectance solaire en utilisant la solution DBR classique. Une autre solution utilisant des diélectriques est étudiée dans la suite.

3.3. Couches réflectrices diélectriques multicouches non périodiques

Les empilements diélectriques étudiés jusqu'ici étaient constitués d'empilements périodiques de deux couches minces ayant toutes les deux une épaisseur fixe, répétées un nombre important de fois. Le but était de concentrer les interférences constructives autour d'une longueur d'onde précise, fixée par l'épaisseur de chaque couche.

Il est également envisageable d'attribuer à chaque couche mince une épaisseur différente pour créer un empilement multicouche non périodique répartissant les interférences constructives sur l'intégralité du spectre solaire, assurant globalement une réflectance solaire élevée. Nous n'avons pas identifié de publications ou de brevets parvenant à ce résultat. Nous allons malgré tout traiter de cette possibilité dans la suite du paragraphe.

Etat de l'art : les films souples 3M®

Bien que les structures de ces films ne soient pas divulguées, le concept de couches réflectrices diélectriques non périodiques semble déjà être appliqué dans les produits commercialisés par le fabricant 3M® [134].

Une publication [24] rapporte en effet un système hybride PV/CSP fonctionnant grâce à un film transparent pour l'énergie de gap du silicium et réfléchissant les autres longueurs d'onde (voir chapitre I, §3.1 p.32). La publication mentionne un film 3M® composé de SiO_2 et TiO_2 .

L'absorption du film dans les courtes longueurs d'onde est conforme à la présence de TiO_2 , comme l'indiquent les spectres de réflectance modélisés au laboratoire (Figure 59, gauche) lors de notre travail collaboratif avec les auteurs (voir chapitre VI, Figure 124 p.223).

3M[®] commercialise également un film baptisé Cool Mirror Film 330 (CMF 330) réfléchissant de 700 à 1300 nm mais transparent pour les autres longueurs d'onde (Figure 59, droite) [134]. Enfin, un film 3M[®] ESR 1100 réfléchissant de 300 à 1000 nm a été caractérisé au laboratoire. Ce film est décrit dans la bibliographie comme non métallique et entièrement constitué de polymères [135], [136]. Sa transparence en dehors de sa plage d'utilisation (300 à 1000 nm) indique qu'il ne contient aucune couche métallique. Comme aucun matériau ne permettrait d'avoir de zone de réflectance ($\Delta\lambda$) aussi large dans un BDR (voir §3.2), il semble que 3M[®] obtienne ces propriétés grâce à des empilements de plusieurs couches minces diélectriques d'épaisseurs variables.

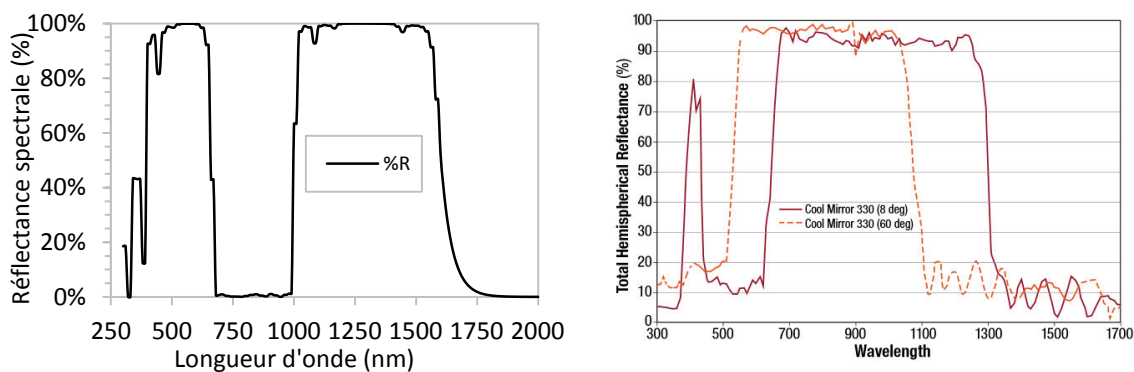


Figure 59 : A gauche, propriétés optiques modélisées du film miroir 3M[®] PV/CSP [24] ; à droite, réflectance spectrale du film 3M[®] CMF 330 à incidence 8° et 60° (graphique issu de la brochure commerciale [134])

Forts de ces constats, nous avons modélisé deux cas de figure d'empilements multicouches non périodiques à base de diélectriques, sur substrat fortement réflecteur puis faiblement réflecteur, afin d'envisager ces solutions comme couches réflectrices pour miroirs solaires et tenter d'améliorer encore les performances des cas décrits précédemment.

Empilements multicouches diélectriques sur support fortement réflecteur

Pour effectuer ces modélisations, nous avons considéré plusieurs alternances de bicouches diélectriques (d'épaisseurs différentes) sur un support fortement réflecteur, dans notre cas de l'argent et de l'aluminium, comme illustré sur la Figure 60. Nous avons étudié les différentes combinaisons possibles de diélectriques parmi SiO_2 (n à 600 nm = 1,47), TiO_2 (n à 600 nm = 2,4), MgF_2 (n à 600 nm = 1,38) et GaAs (n à 600 nm = 3,9). Notre but est d'augmenter la réflectance solaire des deux métaux supports purs : 95,5% pour l'argent et 92,2% pour l'aluminium. L'optimisation du nombre de couches minces diélectriques et de leurs épaisseurs respectives est effectuée grâce à l'algorithme présenté au chapitre II.

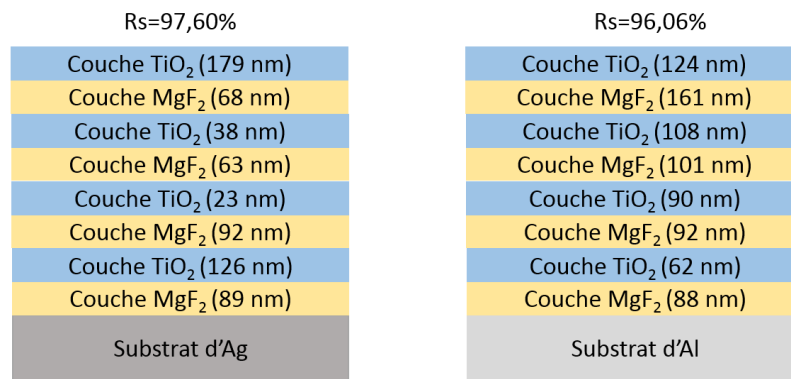


Figure 60 : Empilements de $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ sur de l'argent ou de l'aluminium permettant d'augmenter la réflectance solaire par rapport au substrat seul

Parmi les nombreux cas étudiés, nous présentons seulement ici ceux qui mènent à une amélioration des performances par rapport au substrat non revêtu. Le bicouche $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ est le meilleur couple de matériaux identifié parmi ceux étudiés, menant à une réflectance solaire accrue (97,6%). Nous expliquons ce résultat par la forte différence d'indice de réfraction entre le MgF_2 (n à 600 nm $\approx 1,38$) et le TiO_2 (n à 600 nm $\approx 2,4$). Un empilement de bicouches $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ permet également d'atteindre une réflectance solaire élevée (97,2%), mais dans une moindre mesure. À l'inverse, le GaAs ne donne pas de bons résultats car il est fortement absorbant dans la gamme solaire (22% pour une épaisseur de couche de 100 nm).

Un empilement de bicouches $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ déposées sur un substrat d'argent (Figure 60, gauche) accroît la réflectance solaire de 95,5% (argent seul) à 97,6% (argent et empilement), soit un gain de 2,1%. Le nombre optimal de bicouches $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ est de quatre. Pour un nombre de bicouches inférieur ou supérieur, la réflectance solaire obtenue reste supérieure à celle de l'argent nu (95,5%) mais inférieure à l'optimum atteint avec quatre bicouches (97,6%). Un empilement de quatre bicouches où l'empilement de bicouches est inversé, c'est-à-dire $\text{TiO}_2/\text{MgF}_2$ au lieu de $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$, donne une réflectance solaire de 96,5%, donc supérieure au substrat nu (95,5%) mais inférieure à la valeur optimale (97,6%). L'ordre du bicouche a donc également une importance.

La Figure 61 présente la réflectance spectrale de l'empilement optimisé quatre bicouches $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ sur argent (Figure 60, gauche). On y voit nettement l'augmentation de réflectance dans les gammes UV et visible qui expliquent l'augmentation de la réflectance solaire.

Nous arrivons aux mêmes conclusions en considérant l'aluminium comme matériau support pour l'empilement diélectrique (Figure 60, droite) : quatre bicouches $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ permettent d'accroître la réflectance solaire à 96,1%, soit une valeur supérieure à la réflectance solaire de l'argent seul (95,5%) et un gain de 3,5% par rapport à l'aluminium seul (92,2%). Le nombre de bicouches (4), les matériaux diélectriques (MgF_2 et TiO_2) et l'ordre des couches minces dans le bicouche ($\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$) nécessaires pour atteindre l'optimum de réflectance solaire (96,06%) sont les mêmes que pour l'argent. Seules les épaisseurs sont différentes (Figure 60, droite).

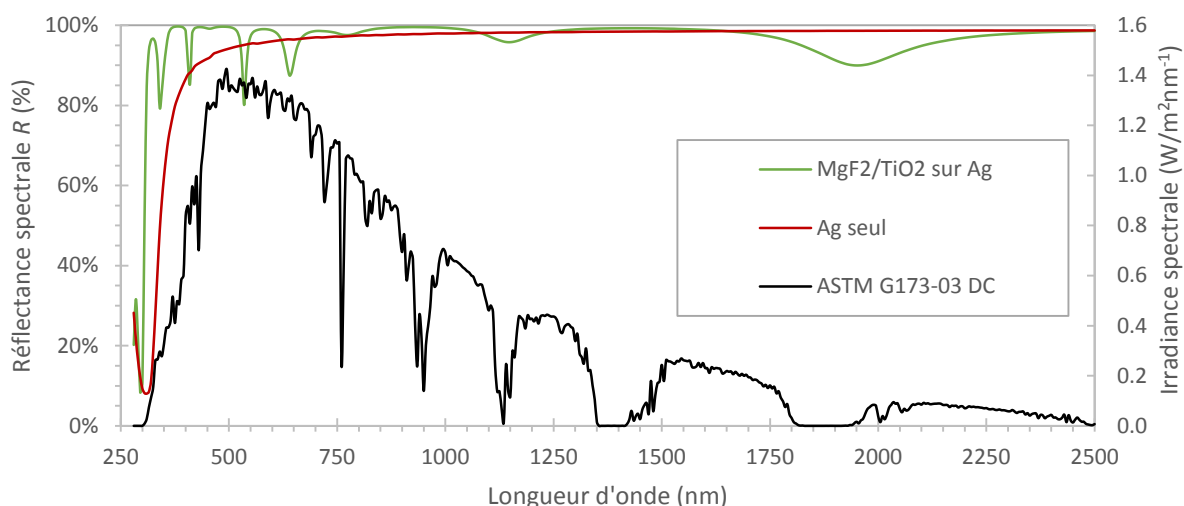


Figure 61 : Réflectance de l'empilement $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ optimal déposé sur argent, comparée à celle de l'argent seul

Ce type d'empilements multicouches diélectriques sur support réflecteur semble très prometteur. Ils permettent en effet d'augmenter de manière significative la réflectance solaire déjà élevée de l'argent (95,5%) et de l'aluminium (92,2%). Ils ouvrent la voie à des miroirs solaires performants sur support aluminium en évitant le recours à l'argent qui est un métal précieux [129].

Empilements multicouches diélectriques sur support faiblement réflecteur

Nous avons ensuite modélisé les mêmes types d'empilements de diélectriques que précédemment, mais cette fois sur des supports plus faiblement réflecteurs, à savoir le fer ($R_s = 60\%$) et le verre ($R_s \approx 4-5\%$). Nos calculs montrent qu'il est également possible d'obtenir un miroir solaire efficace sur ce type de support grâce à des multicouches diélectriques. De nombreuses combinaisons ont à nouveau été étudiées, à partir de SiO_2 , TiO_2 , MgF_2 et ZnO . GaAs est désormais exclu à cause de sa forte absorptance solaire (22% pour une épaisseur de couche de 100 nm). Les meilleurs résultats obtenus sont avec le couple $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$; nous présenterons donc uniquement ceux-ci.

La Figure 62 (gauche) montre l'effet du nombre total de couches de l'empilement multicouche sur la réflectance solaire de l'empilement. Pour un même nombre de couches on peut observer plusieurs points, notamment pour des nombres élevés de couches. Cela est dû à la grande difficulté d'optimisation des épaisseurs dans ce cas précis. L'algorithme n'est pas parfaitement fidèle, et propose plusieurs solutions pour une même initialisation. L'infidélité augmente avec le nombre de couches. On peut observer que pour ce type de solution, le nombre de couches nécessaires est bien plus élevé que précédemment, afin de compenser la faible réflectance du substrat : 30 couches sont nécessaires pour dépasser 90% de réflectance solaire.

La Figure 62 (droite) illustre la réflectance spectrale, sur un spectre solaire complet, de l'empilement donnant le meilleur résultat : une réflectance solaire de 95,5% est obtenue avec 25 bicouches (50 couches) $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ d'épaisseurs optimisées sur un substrat en fer. Cette réflectance solaire est similaire à celle de l'argent pur. Le spectre en réflectance est pourtant

d'allure très différente entre le multicouche et l'argent pur (Figure 50). Ceci est dû au fonctionnement spécifique du multicouche basé sur l'alternance d'interférences constructives et destructives, donnant lieu à des maxima et minima de réflectance spectrale, dont les positions dépendent des épaisseurs des couches, tandis que la réflectance spectrale est relativement constante pour le métal. Malgré ces différences spectrales notables, la réflectance solaire qui est une propriété intégrée en longueur d'onde est identique dans les deux cas. Ceci procure une certaine souplesse dans la conception d'un miroir solaire : des structures très différentes peuvent mener à des performances équivalentes.

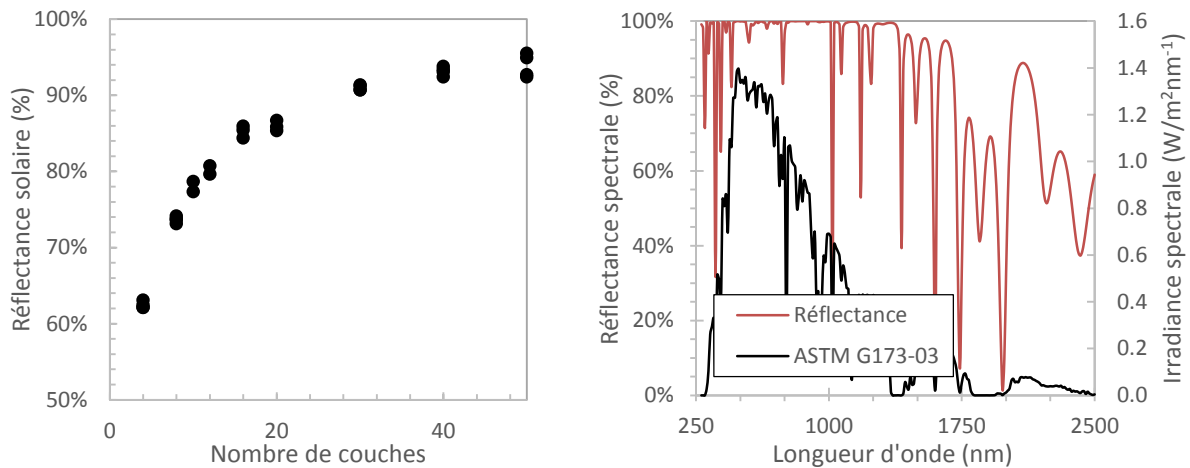


Figure 62 : A gauche, réflectance solaire d'un empilement $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ de bicouches diélectriques sur substrat de fer, en fonction du nombre total de couches. A droite, réflectance spectrale observée pour 50 couches $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ optimisées.

Enfin, le substrat sur lequel est déposé l'empilement $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ impacte également la réflectance solaire : le record pour un substrat de verre est de 94,6% (4,1% pour le verre BK7[®] nu) contre 95,5% pour un substrat de fer (60% pour le fer nu), soit une différence de 0,9%.

Il est donc possible d'obtenir des réflectances solaires proches ou égales à celle de l'argent seul via uniquement des matériaux diélectriques. Plus le matériau support est réflecteur, plus la performance solaire atteinte est élevée.

3.4. Conclusions sur les couches réflectrices solaires

Les collecteurs solaires utilisent tous un ou plusieurs miroirs pour concentrer la densité de flux du soleil sur un absorbeur thermique. Une réflectance solaire élevée est donc indispensable. Cette propriété s'obtient facilement avec des couches minces métalliques. Parmi les métaux disponibles, l'argent et l'aluminium donnent les meilleurs résultats, avec des réflectances solaires de 95,5% et 92,2% respectivement. En utilisant conjointement ces deux métaux, il est même possible d'obtenir une réflectance solaire de 95,85%, en recouvrant un miroir d'aluminium d'une fine couche (40 nm) d'argent. Des empilements de couches minces diélectriques, sur substrats réflecteurs ou non, peuvent également constituer des miroirs solaires efficaces. Un empilement avec un nombre élevé (≈ 50) de couches minces diélectriques (en particulier une succession de bicouches $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) sur un substrat de fer (ou par extension, d'acier inoxydable) permet de retrouver la réflectance solaire de l'argent (95,5%). En utilisant

un métal déjà fortement réflecteur comme support, il est même possible, avec un nombre plus réduit de couches minces diélectriques (ici 4 bicouches $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$), d'augmenter la réflectance solaire au-delà des limites des métaux seuls. Cela permet par exemple d'obtenir un miroir sur support aluminium ayant une réflectance solaire de 96,1%, soit 0,6% de plus que l'argent seul. Ce type de miroir peut s'avérer très prometteur à la fois en économie de matière précieuse et également en performance solaire.

Nous avons également étudié de nombreux autres cas pour tenter d'augmenter la réflectance solaire ou pour réaliser des économies de matière, qui se sont quant à eux avérés infructueux. Ceux-ci sont présentés en détail dans les annexes (§4.1 et 4.2, p.290). L'utilisation de composites métalliques (mélange de deux métaux) ne fait par exemple que dégrader les performances solaires. Il n'est donc pas possible de réaliser des économies de matière de cette façon, par exemple en remplaçant une partie de l'argent par un autre métal, sans impacter la réflectance solaire. Des empilements périodiques autres qu'une alternance diélectrique/diélectrique (alternances métal/diélectrique ou métal/métal) sont également peu productifs avec des performances inférieures à celles des métaux seuls. Ces solutions n'ont donc pas été retenues.

IV. Effets additionnels : vers les miroirs et collecteurs solaires réels

Les réflectances solaires simulées jusqu'ici pour les couches réflectrices sont supérieures à celles rapportées dans la bibliographie (chapitre I, §4.3, p.46). Plusieurs paramètres n'étaient en effet pas pris en compte par rapport aux miroirs solaires réels, en particulier l'ajout de couches de protection superficielles, la rugosité des surfaces et interfaces, et l'incertitude d'épaisseur expérimentale sur les couches constituant les miroirs. Nous présenterons dans ce qui suit plusieurs séries de modélisations permettant d'étudier ces phénomènes. Nous monterons également une modélisation complète de miroirs solaires tels que présentés dans la Figure 48, c'est-à-dire incluant un support, une éventuelle couche de face arrière, une ou des couches réfléchissantes (métallique(s) ou diélectriques) et une couche de protection. Enfin, nous étudierons l'effet sur les performances solaires de réflexions multiples sur des miroirs en cascade, comme l'on peut en rencontrer dans les collecteurs solaires.

4.1. Effet de l'ajout de la couche superficielle de protection pour la couche réflectrice

Actuellement tous les miroirs solaires possèdent une couche de protection vis-à-vis de l'environnement extérieur (voir §2.2 p.114). Leur but est de limiter l'altération des couches réflectrices par l'oxydation, les fissurations, la délamination, l'impact de débris, etc. [121], [65]. L'utilisation de ces couches de protection peut avoir un impact sur les performances solaires de la couche réflectrice. Nous allons étudier cet impact dans la suite du paragraphe.

Trois familles de couches protectrices ont été identifiées dans la bibliographie [121], [137] comme l'illustre la Figure 63. Chaque type de couche protectrice a un ordre de grandeur d'épaisseur différent : millimètre pour le verre (à gauche), micromètre pour les couches d'oxydes transparents (au milieu) et centaine de micromètres pour les couches de protection en polymère (à droite).

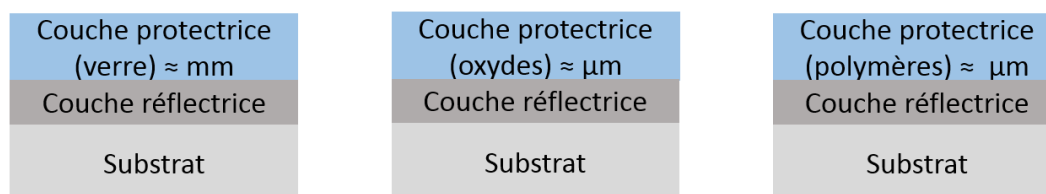


Figure 63 : Architecture de miroirs comprenant une couche protectrice

Vis-à-vis de la modélisation, la difficulté réside dans le fait que la couche protectrice peut créer des interférences constructives et/ou destructives additionnelles. En raison de son épaisseur qui peut être élevée (1 μ m à 10 mm) par rapport aux longueurs d'onde incidentes (280 nm à 2,5 μ m), le nombre d'interférences peut être très important, ce qui peut « bruyier » le spectre de réflectance.

Couches de protection en verre

La Figure 64 (gauche) montre la réflectance spectrale d'un système verre BK7[®] (couche protectrice) sur argent (couche réfléchissante de 150 nm). On y retrouve de nombreuses interférences dues à l'épaisseur du verre, de l'ordre du mm. Si on trace la réflectance solaire correspondante en fonction de l'épaisseur de la couche protectrice (Figure 64, droite), on obtient une évolution globalement linéaire montrant que lorsque l'épaisseur de la couche de protection augmente, la réflectance solaire décroît. La décroissance est cependant faible car le verre choisi est suffisamment transparent. La « nuée de points » observée sur la Figure 64 (droite) est directement liée aux interférences (Figure 64, gauche), qui peuvent coïncider ou non avec les micro-variations du spectre solaire (illustrées par exemple par la courbe noire sur la Figure 61, p.128). Cela entraîne que deux épaisseurs de couche de protection très proches peuvent mener à une réflectance solaire différente.

Nous avons également étudié l'influence de la nature du verre employé pour protéger une couche d'argent sur la réflectance solaire de l'ensemble (95,5% pour l'argent nu). Six verres différents, représentatifs de groupes de verre de différentes qualités optiques et compositions chimiques [138], ont été testés. Du verre avec une très faible absorptance solaire (forte transmittance) est préféré [137], tels que les verres BK7[®] et FK51A[®]. Cette propriété est assurée par une très faible teneur en fer [52]. La Figure 65 illustre la réflectance solaire d'une couche réfléchissante d'argent de 150 nm pour les six verres de protection, en fonction de l'épaisseur de verre. Comme précédemment (Figure 64) les courbes ne sont pas parfaitement continues à cause du bruit créé par les interférences liées à l'épaisseur du verre. L'étoile sur l'axe de la réflectance solaire représente la réflectance solaire de l'argent seul (95,5%), sans couche de protection, et sert de référence.

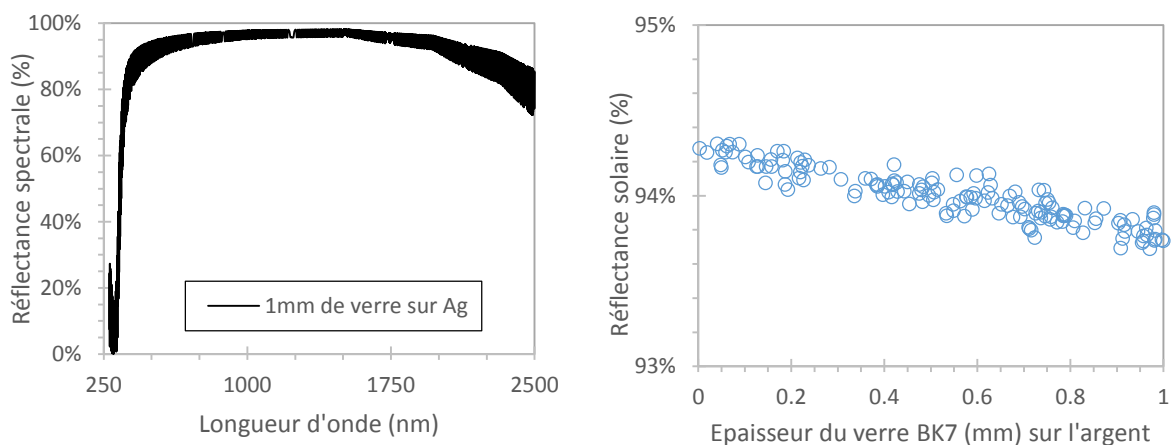


Figure 64 : A gauche, réflectance d'une couche réflectrice argent avec une couche de protection de 1 mm en verre BK7® ; à droite, réflectance solaire du système en fonction de l'épaisseur de verre protecteur

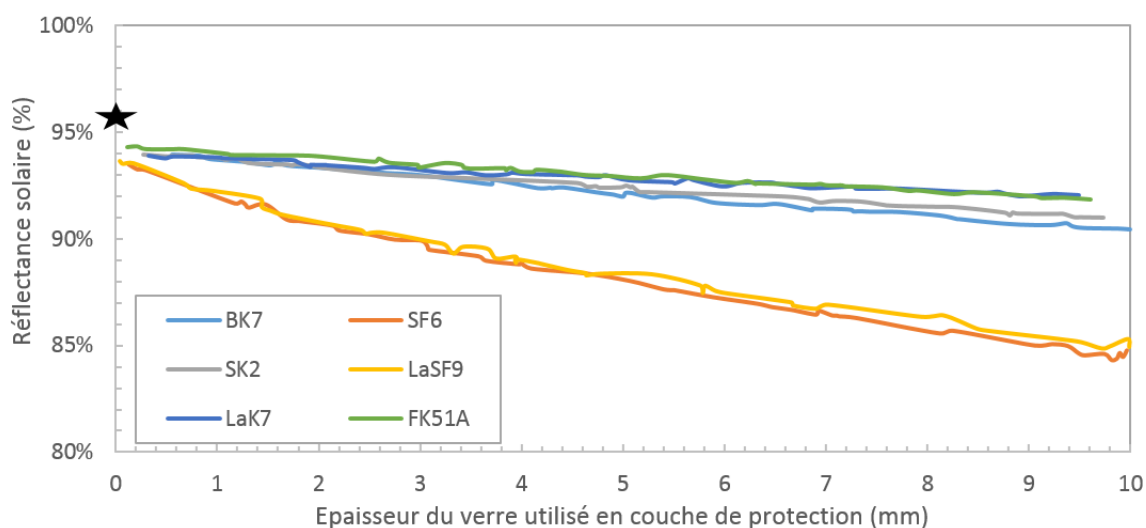


Figure 65 : Réflectance solaire d'une couche réflectrice argent protégée par différents verres, en fonction de l'épaisseur de verre

Quel que soit le verre de protection, la réflectance solaire du système diminue logiquement avec l'épaisseur de verre utilisée. Les verres de type FK et BK sont ceux qui impactent le moins la réflectance solaire, tandis que les verres de type LaSF et SF la dégradent car ils sont plus absorbants. Dans tous les cas, des épaisseurs même très faibles de verre ($< 0,1$ mm) réduisent déjà d'environ 1% la réflectance solaire ($\leq 94,5\%$) par rapport à l'argent nu ($95,5\%$). Cela est dû au coefficient d'extinction non nul des verres dans l'UV et l'IR [138].

Couches de protection à base d'oxydes transparents

Des solutions protectrices à base de couches minces d'oxydes transparents tels que SiO_2 ou Al_2O_3 sont aussi couramment décrites dans la bibliographie [139], [140], [141]. Elles sont déposées par des procédés sous vide ou par sol-gel avec des épaisseurs de l'ordre du micromètre. Parfois, une couche additionnelle de TiO_2 rajoute un effet autonettoyant en tirant partie des propriétés photocatalytiques et de l'hydrophilicité du TiO_2 [142], [143]. La Figure 66 illustre les résultats de simulation obtenus pour différents oxydes déposés sur miroirs argent.

Les indices de réfraction complexes utilisés sont disponibles dans la littérature [144], [145]. Comme précédemment, l'étoile sur l'axe de la réflectance solaire représente la réflectance solaire de l'argent seul (95,5%), sans couche de protection.

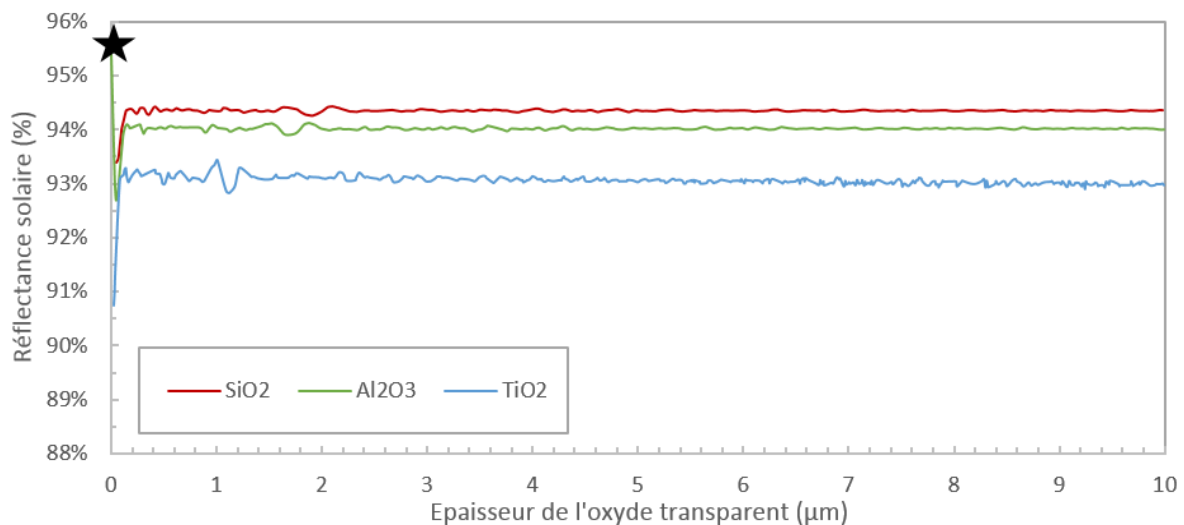


Figure 66 : Réflectance solaire d'un miroir argent recouvert d'une couche protectrice d'oxyde, pour différents oxydes, en fonction de l'épaisseur d'oxyde

Contrairement au cas des verres, la réflectance solaire ne dépend pas de l'épaisseur de la couche protectrice d'oxyde. Cela est dû à leur grande transparence ($k = 0$) dans un large domaine de longueurs d'onde. Ces matériaux sont toutefois opaques dans l'UV (200 à 380 nm), notamment le TiO₂. Cela explique la diminution de réflectance solaire, due à l'absorption de la couche d'oxyde, par rapport à une couche d'argent seule non protégée (95,5% de réflectance, étoile sur l'axe). De plus, aux très fines épaisseurs d'oxyde (typiquement < 100 nm), la réflectance solaire chute brutalement, car la couche d'oxyde de protection joue le rôle d'antireflet. La réflectance solaire remonte ensuite et se stabilise aux épaisseurs plus grandes (> 200 nm).

Couches de protection polymères

Il est également possible d'utiliser des polymères transparents comme couche protectrice. C'est principalement le cas pour des films réfléchissants souples. Les films ReflecTech® [146] ou 3M ESR 1100® [136] sont les plus connus. Leur épaisseur est de l'ordre de 100 μm. La société Helioprocess a également testé le polycarbonate (PC) ou le polyméthacrylate de méthyle (PMMA) d'une épaisseur de 150 μm, comme couche de protection pour ses miroirs argent souple. Nous avons simulé de tels cas. La Figure 67 illustre la décroissance linéaire de la réflectance solaire avec l'épaisseur pour le cas du polycarbonate (PC). La réflectance solaire diminue progressivement avec l'épaisseur du PC, dû à son coefficient d'absorption non nul. Le PC est en effet très absorbant dans les UV (de 280 à 360 nm), dans le proche IR (de 1635 à 1770 nm) et dans l'IR (au-delà de 2040 nm). Cela entraîne une diminution rapide de la réflectance solaire dès les très fines épaisseurs de PC : R_s passe de 95,5% (argent nu, étoile sur l'axe des ordonnées) à environ 94,2% à partir de quelques centaines de nanomètres. Comme

pour les autres couches de protection, nous observons une nuée de points, dues aux multiples interférences constructives et destructives.

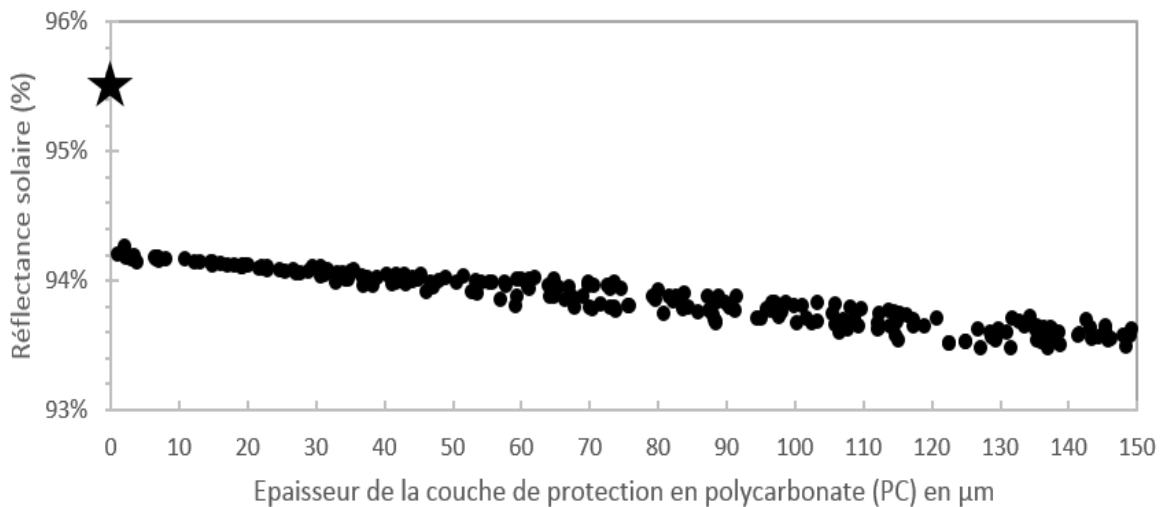


Figure 67 : Réflectance solaire d'un miroir argent avec couche protectrice de polycarbonate, en fonction de l'épaisseur de la couche protectrice

Bilan

Les couches de protection, indispensables à la durée de vie des couches réfléchissantes, impactent légèrement la réflectance solaire. L'absorptance solaire du verre permet d'expliquer en grande partie la différence de réflectance solaire entre une couche mince réfléchissante seule (95,5% pour l'argent brut) et un miroir protégé (93,5%). La réflectance solaire décroît linéairement lorsque l'épaisseur de la couche de verre augmente. Le Polycarbonate (PC) conduit à des résultats similaires car il est lui aussi légèrement absorbant.

Qualitativement, le SiO_2 en couche mince est le meilleur des matériaux de protection disponibles pour conserver une réflectance solaire élevée (supérieure à 94 %). Cette solution peut également permettre d'alléger les structures de miroirs en raison de la faible épaisseur nécessaire (1 à 10 μm) et s'implémente bien dans des collecteurs solaires protégeant leurs miroirs des conditions extérieures (GlassPoint, Heliotrope, Cassegrain, voir chapitre I, p.32). Par contre, pour des miroirs exposés aux conditions extérieures (cylindro-paraboliques par exemple), ce type de couches fines risque de ne pouvoir assurer une fonction de protection à long terme (la durée d'exploitation d'une centrale solaire étant typiquement de 20 à 25 ans). De manière générale, il serait nécessaire de poursuivre cette étude sur les couches protectrices, en incluant des analyses de vieillissement de celles-ci et en considérant leur durabilité comme autre critère de sélection.

4.2. Effet de la rugosité de surface et de l'incertitude d'épaisseur des couches déposées

Les méthodes de simulation utilisées pour étudier grâce au code COPS l'effet sur les performances optiques de la rugosité naturelle des couches déposées et de l'incertitude expérimentale sur leurs épaisseurs sont expliquées en détail dans le chapitre II (§3.3.2, p.83).

Influence de la rugosité

La méthode utilisée jusqu'ici pour calculer la réflectance, la transmittance et l'absorptance spectrales avec les coefficients de Fresnel suppose que la délimitation entre deux milieux (l'interface) est parfaite. Le rayonnement passe directement du milieu 1 au milieu 2 sans rencontrer de milieu intermédiaire. Dans un empilement réel on rencontrera une rugosité, souvent très faible, entre chaque couche mince déposée. Le milieu intermédiaire résultant est alors un mélange de la couche supérieure et de la couche inférieure. Ce milieu peut être modélisé par les modèles d'approximation du milieu effectif (EMA, voir chapitre I, §5.4, p.58), comme un composite constitué en proportions égales des deux matériaux de part et d'autre de l'interface.

Nous considérons un miroir solaire constitué d'une couche réflectrice recouverte d'une couche protectrice (Figure 68). Ce système comporte trois interfaces : entre l'air et la couche protectrice (rugosité n°1), entre la couche protectrice et la couche réflectrice (rugosité n°2), et entre la couche réflectrice et le substrat (rugosité n°3).

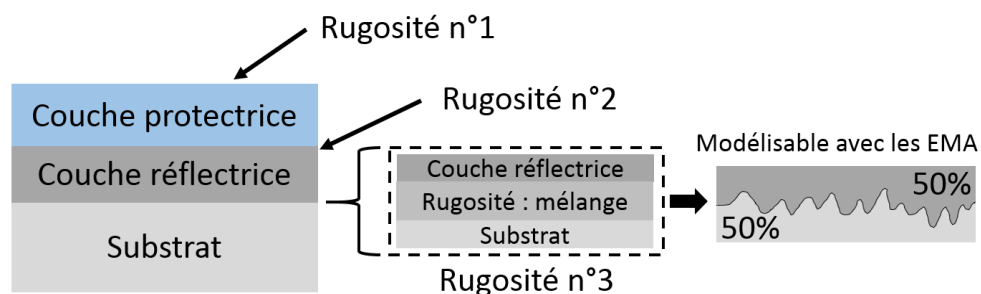


Figure 68 : Types de rugosité d'un empilement réfléchissant

A partir de cet empilement, nous avons étudié l'effet de la rugosité entre chaque couche mince sur la réflectance solaire de l'empilement complet. La Figure 69 illustre le cas d'un empilement « substrat verre / couche réflectrice Ag (150 nm) / rugosité n°2 / verre protecteur BK7[®] (1 mm) / rugosité n°1 / air ». L'épaisseur des rugosités varie de 0 à 20 nm et s'ajoute à l'épaisseur initiale de l'empilement. Les observations suivantes peuvent être faites.

1. **Rugosité n°1 : air / couche protectrice.** Cette rugosité a une influence peu marquée sur les performances. Une partie du rayonnement incident, de l'ordre de 4 à 5%, est réfléchi par cette interface (voir chapitre V), dû au changement d'indice de réfraction entre l'air et la couche protectrice ($n \approx 1,5$ pour SiO₂ ou verre BK7[®]). Une rugosité élevée à cette interface diminue légèrement la réflexion et augmente le rayonnement transmis vers la couche réflectrice.

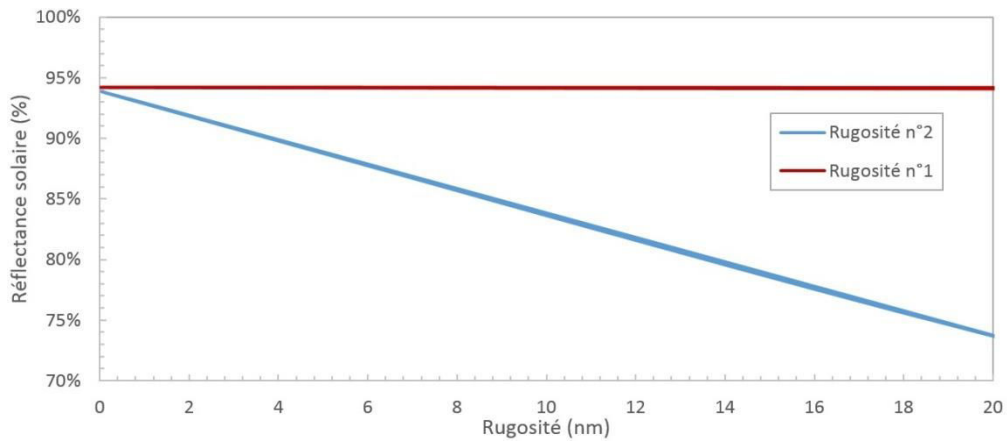


Figure 69 : Effet des rugosités aux interfaces sur la réflectance solaire de l'empilement substrat / Ag (150 nm) / rugosité n°2 / verre protecteur BK7® (1 mm) / rugosité n°1 / air

2. **Rugosité n°2 : couche protectrice / couche réflectrice.** Cette rugosité a un impact très important sur les propriétés optiques. Premièrement, une rugosité élevée (> 5 nm) favorise la réflexion diffuse au lieu d'une réflexion spéculaire (voir §2.1, p.111). Deuxièmement, cette zone de rugosité est un mélange entre le matériau réflecteur (métallique) et la couche de protection (diélectrique). Ce type de matériau, appelé cermet (composite céramique-métal, voir chapitre VI), est opaque et faiblement réflecteur, on l'utilise souvent comme absorbeur. L'absorptance de ce cermet peut causer une perte de réflectance solaire très supérieure à celle due au phénomène de réflexion diffuse. Des rugosités très faibles doivent donc être atteintes pour cette interface, inférieures à 2-3 nm.
3. **Rugosité n°3 : couche réflectrice / substrat.** Cette rugosité n'a aucun impact sur la réflectance. Si la couche réflectrice est optimisée, elle est suffisamment épaisse (> 100 nm), donc opaque, pour masquer le rayonnement avant qu'il n'atteigne cette interface. Tout comme le substrat, elle ne joue alors aucun rôle optiquement.

En conclusion, la rugosité entre la couche de protection et la couche réflectrice est la seule qui a un impact réel sur la réflectance solaire. Cette interface requiert donc une attention particulière. En fonction de la méthode de fabrication du miroir, le contrôle de cette rugosité peut être problématique. Dans certains cas, la couche de protection est le substrat lui-même (verre), sur lequel la couche réflectrice est déposée (cas b et e de la Figure 48, du haut vers le bas sur la Figure 68). Il peut alors être judicieux de déposer une pré-couche sur le substrat verre, par exemple d'un diélectrique transparent, avant de déposer la couche réflectrice. Cela permet d'assurer une rugosité très faible entre le matériau transparent et la couche réflectrice. Si le dépôt est réalisé dans l'autre sens (du bas vers le haut sur la Figure 68), la couche de protection est cette fois déposée en dernier, sur la couche réflectrice. Il est donc nécessaire dans ce cas que la couche réflectrice soit très peu rugueuse.

En complément, nous avons caractérisé au laboratoire la rugosité de nombreux échantillons de verres et polymères souples (PC et PMMA). Les verres testés, principalement de type flottés, c'est-à-dire fabriqués en laissant flotter le verre liquide sur un bain d'étain en fusion, présentaient une rugosité inférieure à 1 nm (mesure au profilomètre). Ces verres sont donc de bons candidats pour les miroirs solaires (substrats ou couches de protection).

Influence de l'incertitude en épaisseur des couches minces déposées

Nous cherchons ici à évaluer la tolérance de la réflectance solaire vis-à-vis des incertitudes d'épaisseur de la ou des couches minces composant un miroir. En effet, des écarts peuvent apparaître entre les épaisseurs optimales calculées lors du design d'un miroir, et celles déposées expérimentalement. La sensibilité de la performance optique à la précision sur l'épaisseur déposée orientera le choix du procédé et des conditions d'élaboration (voir chapitre II, §3.3.2 p.83). Distinguons différentes structures de couches réflectrices.

Monocouche : Pour une couche réflectrice composée d'une seule couche métallique, des erreurs sur l'épaisseur de celle-ci n'ont aucun impact. En effet, comme nous l'avons vu au paragraphe 3.1 (p.116), l'optimum de réflectance solaire est simplement atteint lorsque la couche métallique a une épaisseur suffisante (par exemple 150 nm pour l'argent), et ce quel que soit le substrat (Figure 51, p.118). Même si le procédé d'élaboration choisi implique une incertitude élevée sur l'épaisseur déposée (par exemple ± 10 nm), il suffit donc de viser une épaisseur supérieure à celle attendue (par exemple 110 à 160 nm) pour être sûr que la couche métallique fera au minimum l'épaisseur requise.

Bicouche : Pour une couche réflectrice métallique bicouche de type substrat/Al/Ag (Figure 54, p.121), l'optimum de réflectance solaire (95,85%) est atteint avec 133 nm d'aluminium et 39 nm d'argent (Table 12, p.121), contre 95,5% pour l'argent seul (150 nm). Dans ce cas, l'impact d'une erreur sur l'épaisseur de la sous-couche d'aluminium est nul car son rôle est de masquer le substrat. Le comportement de la couche d'aluminium est décrit par le cas monocouche (point précédent). L'épaisseur de la couche supérieure d'argent doit quant à elle être contrôlée plus finement pour garantir la réflectance solaire maximale. Si cette couche est trop fine, elle sera majoritairement transparente et le bénéfice d'utiliser de l'argent (plus réflecteur que l'aluminium) sera perdu. Trop épaisse, elle masquera la couche inférieure d'aluminium et c'est le bénéfice de ce dernier (réflexion des UV au bleu transmis par l'argent) qui sera perdu. Pour observer un léger gain de réflectance solaire par rapport à une couche d'argent de 150 nm (+0,35%), l'épaisseur de la couche d'argent dans le bicouche Al/Ag doit être comprise entre 20 et 60 nm avec un optimum à 39-40 nm. Une incertitude d'épaisseur de ± 10 nm conduit à une réflectance solaire moyenne de 95,83% sur cette gamme d'épaisseur, soit une perte de -0,02% par rapport à l'optimum à 40 nm (95,85%). La tolérance sur l'incertitude d'épaisseur reste donc malgré tout relativement grande.

Multicouche : Les performances optiques des couches réflectrices utilisant un empilement multicouche diélectrique sont quant à elles plus sensibles aux incertitudes d'épaisseur. Une légère modification des épaisseurs autour de la valeur optimale déplace la zone de réflectance maximale (voir §3.3, p.125) ou crée davantage d'interférences destructives ce qui diminue la réflexion. Ces structures présentant un nombre élevé de couches minces (de 8 à 50) ayant des épaisseurs très variées, il n'est pas possible avec un temps de calcul raisonnable de quantifier simultanément l'effet d'une incertitude d'épaisseur différente sur chacune d'elles. Nous considérons donc dans ce cas une incertitude d'épaisseur identique pour toutes les couches minces de l'empilement (de ± 2 nm à ± 20 nm). La Figure 70 illustre la réflectance solaire moyenne simulée pour différentes incertitudes de dépôt d'un empilement de quatre bicouches

MgF₂/TiO₂ sur argent (§3.3, Figure 60 gauche, p.127). Dans ce cas, des variations d'épaisseur de ± 10 nm autour de la valeur optimale correspondent à des pourcentages d'incertitudes sur l'épaisseur compris entre 6% et 44% selon la couche considérée (épaisseurs comprises entre 23 et 179 nm). Malgré un empilement complexe, la réflectance solaire varie peu avec, par exemple, une perte moyenne de -0,18% pour une incertitude en épaisseur de ± 10 nm (97,43%) par rapport à l'optimum (97,61%). Cela représente une perte certes limitée mais tout de même neuf fois plus élevée que pour le bicouche Al/Ag au même niveau d'incertitude en épaisseur.

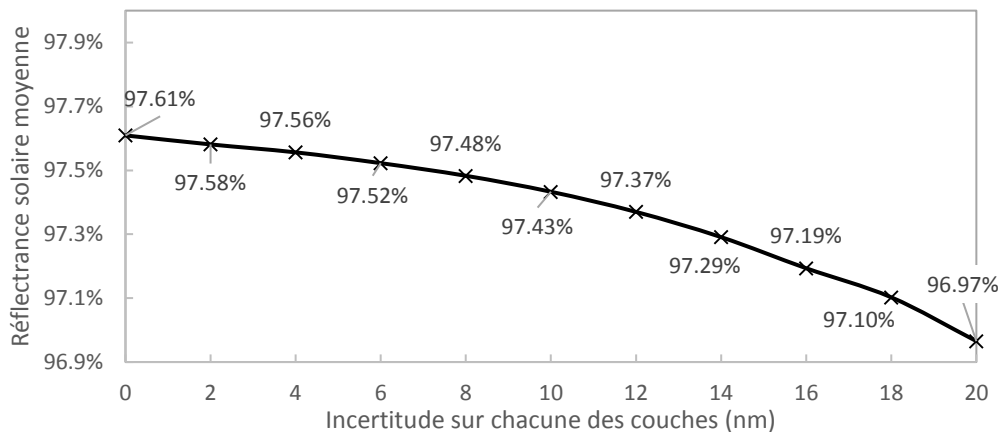


Figure 70 : Réflectance solaire moyenne d'un empilement 4 bicouches MgF₂/TiO₂ sur argent en fonction des incertitudes de dépôt

En conclusion, la réflectance solaire des miroirs métalliques est peu dégradée par des erreurs expérimentales commises sur les épaisseurs de couches par rapport à l'épaisseur optimum désirée. L'erreur d'épaisseur admissible (c'est-à-dire avec une faible perte de réflectance solaire par rapport à l'optimum) est supérieure à ± 10 nm, soit de l'ordre de $\pm 25\%$ par rapport à l'épaisseur visée (40 nm dans le cas de la couche Ag d'un miroir Al/Ag). Les miroirs à base de multicouches diélectriques sont légèrement plus sensibles aux erreurs sur les épaisseurs.

La majorité des procédés d'élaboration peut garantir une précision en épaisseur de ± 10 nm s'ils sont opérés correctement. Il est donc possible pour les couches réflectrices solaires d'utiliser des méthodes de dépôt courantes sans rechercher une grande précision sur l'épaisseur. Cela permet par exemple de déposer des couches minces à plus grande vitesse (augmentant les volumes de production et réduisant les coûts de fabrication).

Enfin, il faut garder à l'esprit que la valeur de l'indice de réfraction complexe du matériau réellement déposé, qui peut être différent de celui modélisé, peut jouer également sur les performances solaires. Nous n'avons pas considéré ici les erreurs possibles sur l'indice de réfraction, qui peuvent notamment être causées par l'évolution de l'indice avec l'épaisseur de la couche dans certains cas. C'est d'ailleurs plutôt en ce sens que les performances solaires peuvent être indirectement sensibles à la précision sur les épaisseurs de couches déposées.

4.3. Modélisation de miroirs solaires complets

Nous avons calculé la réflectance solaire de quelques architectures de miroirs solaires complets inspirées de celles de la Figure 48 (p.114), en considérant les solutions couches minces réfléchissantes et de protection les plus performantes. La Figure 71 illustre les cinq types d'empilements simulés, qui sont décrits en détail ci-après. Les épaisseurs des couches réfléchissantes (métalliques pour les miroirs n°1 à 4, et diélectriques pour le miroir n°5) sont optimisées grâce au code COPS, de même que celles des couches de protection du miroir n°1 (couches SiO₂ et TiO₂). Les épaisseurs des couches de protection des miroirs n°2 à 5 (BK7[®] 3 mm, TiO₂ 50 nm, SiO₂ 10 µm) sont quant à elles fixées en nous inspirant de la bibliographie.

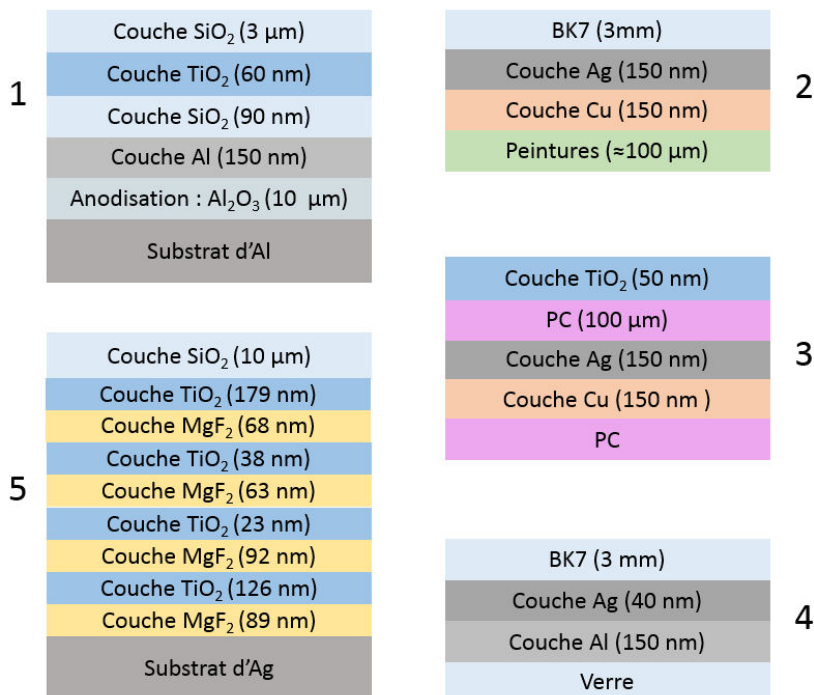


Figure 71 : Miroirs solaires complets modélisés

Les miroirs n°1 à 3 sont basés sur des structures de miroirs solaires commerciaux :

1. Miroir composé d'un support d'aluminium anodisé (Al₂O₃ 10 µm) et d'une couche réfléchissante Al (150 nm) / SiO₂ (90 nm) / TiO₂ (60 nm), protégée par une couche épaisse de SiO₂ (3 µm). Cette structure reprend celle des miroirs Alanod Miro-Sun[®] [137], [139].
2. Miroir avec une couche réfléchissante d'argent (150 nm) déposée sur substrat de verre BK7[®] de 3 mm servant également de protection, avec une couche face arrière de cuivre (150 nm). Cette structure reprend celle des miroirs RioGlass et Flabeg [122].
3. Miroir avec une couche réfléchissante d'argent (150 nm) sur une couche face arrière de cuivre (150 nm), protégées des deux côtés par du polycarbonate (substrat d'un côté, couche de protection de 100 µm de l'autre), recouvert d'une couche de TiO₂. Cette structure reprend celle du film réfléchissant ReflecTech[®] [146], [147], [148].

Les miroirs n°4 et 5 sont inspirés d'architectures existantes (Figure 48) et proposent une structure optimisée issue de nos constats précédents :

4. Miroir avec une couche réflectrice composée d'un bicouche argent sur aluminium (Al 150 nm / Ag 40 nm) déposé sur verre et recouvert d'un verre protecteur BK7® de 3 mm (voir §3.1, p.116).
5. Miroir multicouche diélectrique à quatre bicouches $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ déposées sur argent et protégées par une couche SiO_2 (10 μm) (voir §3.3, p.125).

La Table 13 donne la réflectance solaire calculée pour ces diverses architectures.

Table 13 : Réflectance solaire des miroirs solaires modélisés

Miroir solaire n°	1	2	3	4	5
Réflectance solaire	93,28%	93,16%	92,24%	93,61%	97,57%

Les réflectances solaires simulées pour les miroirs n°1 à 3 sont proches de celles des composants commerciaux présentés dans le chapitre I, qui se situent entre 93% et 93,5%. Les pertes de réflectance solaire observées entre des couches métalliques seules (§3.1, p.116) et les miroirs complets sont principalement dues à l'absorption de la couche de protection (§4.1, p.130). Il n'est cependant pas possible de se départir de celle-ci car elle garantit la durée de vie du miroir.

Les miroirs n°4 et 5 ouvrent des voies d'amélioration des performances. L'usage d'un bicouche Al/Ag comme couche réflectrice (miroir n°4) permet un gain de réflectance solaire de l'ordre de 0,45% par rapport à une structure classique à couche réflectrice métallique telle que le miroir n°2. Une autre solution pour l'amélioration des performances est de réduire l'absorption solaire des couches de protection : pour cela elles doivent être plus fines et/ou utiliser des matériaux plus transparents que le verre ou le polycarbonate. Les oxydes SiO_2 , Al_2O_3 et TiO_2 sont de bons candidats. Correctement agencés, ceux-ci peuvent également agir comme miroirs diélectriques et accroître la réflectance solaire. C'est le cas pour le miroir n°1 dont la réflectance atteint 93,28% avec un bicouche $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$, contre 92,2% pour l'aluminium seul. De même, le miroir n°5 présente une réflectance solaire de 97,57% avec quatre bicouches $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ et une couche de protection SiO_2 de 10 μm , contre 95,5% pour l'argent seul.

Ces options sont donc les plus prometteuses, et les seules qui permettent d'augmenter la réflectance solaire au-delà des limites intrinsèques des meilleurs métaux réflecteurs. Des couches diélectriques fines déposées sur réflecteurs métalliques sont la clef pour augmenter la réflectance solaire. Cependant la durabilité de ces structures originales en conditions réelles d'usage dans des collecteurs solaires devra être étudiée afin de valider ces solutions.

4.4. Effet des réflexions multiples dans les collecteurs solaires

Dans ce qui précède, nous avons calculé les performances solaires de miroirs pris isolément. Certaines technologies de collecteurs solaires à concentration utilisent cependant des réflexions multiples. Parmi les collecteurs existants, nous avons en effet recensé cinq technologies utilisant deux surfaces réfléchissantes (voir chapitre I, Table 1, p.40). Nous avons donc cherché à maximiser la réflectance solaire totale d'un système de deux miroirs en cascade, donc la densité de flux finalement disponible pour l'absorbeur suite à une double réflexion. Afin de quantifier l'effet d'une double réflexion, nous avons choisi deux matériaux offrant chacun séparément une bonne performance solaire : l'argent et l'aluminium (voir §3.1, p.116). Nous les étudions ci-dessous au travers de trois cas : deux miroirs Ag successifs (Ag*Ag), deux miroirs Al successifs (Al*Al), un miroir Ag suivi d'un miroir Al (Ag*Al). Nous avons tenu compte d'une rugosité de surface typique de 5 nm (voir §4.2, p.134). La couche protectrice superficielle n'est pas considérée ici en première approximation.

La réflectance solaire d'un ensemble de deux miroirs peut être calculée par l'équation (I-7) (méthode exacte par intégrale des produits, chapitre I, §5.2, p.50). Pour cela, il est nécessaire de considérer le spectre solaire incident sur le second miroir comme celui réfléchi par le premier miroir. Nous avons comparé ces résultats plus exacts au produit des réflectances solaires de surfaces prises isolément (méthode classique par produit des intégrales, équation (I-8), chapitre I, §5.2, p.50). Dans ce cas-là, le spectre solaire incident sur chaque miroir est considéré comme étant le spectre solaire incident direct, non modifié par la première surface.

La Figure 72 présente la réflectance spectrale calculée pour les trois cas de double réflexion explicités ci-dessus (courbes en pointillés). A titre de comparaison, les courbes pleines correspondent aux réflectances spectrales d'un miroir unique Ag ou Al. Les deux méthodes de calcul de la réflectance solaire totale (équations (I-7) et (I-8)) sont comparées dans la Table 14.

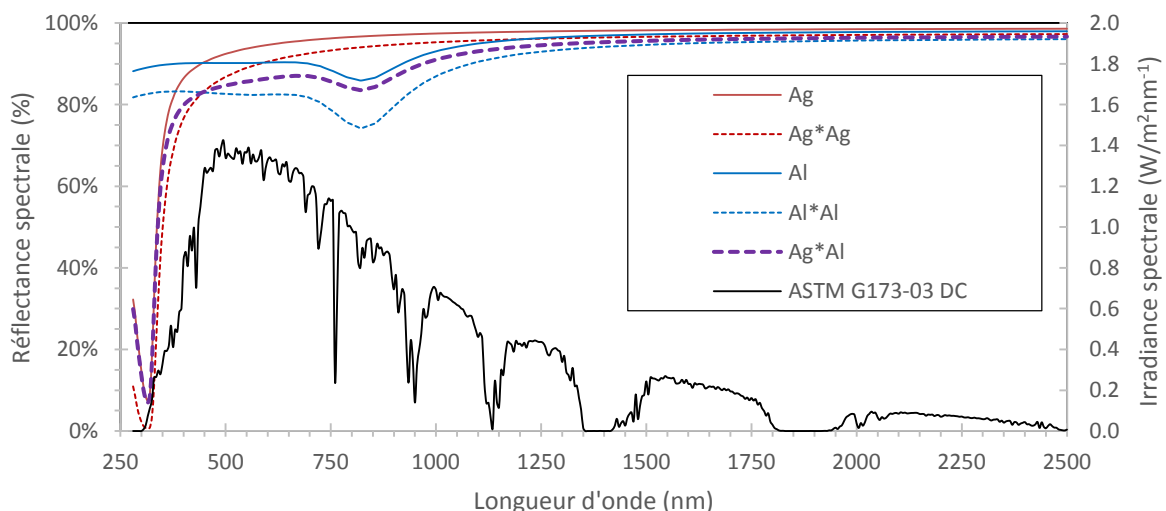


Figure 72 : Réflectance solaire d'un ou de plusieurs miroirs métalliques

Table 14 : Réflectance solaire totale dans le cas de réflexions simples ou multiples, selon deux méthodes de calcul

Equation	Principe	Ag seul	Ag*Ag	Al seul	Al*Al	Ag*Al
(I-8)	« Produit des intégrales » (méthode classique)	94,67%	89,62%	91,35%	83,45%	86,48%
(I-7)	« Intégrale des produits » (méthode exacte)	94,67%	90,79%	91,35%	84,31%	87,28%

Nous remarquons premièrement une différence non négligeable entre les deux méthodes de calcul de la réflectance solaire. Par exemple, pour une double réflexion d'argent (Ag*Ag), nous observons un écart de 1,2% entre les deux méthodes de calcul. Cet écart est notable car l'argent est faiblement réflecteur dans les UV (200-380 nm), phénomène de plus légèrement amplifié par la rugosité de surface de 5 nm considérée pour le calcul. Or, en utilisant l'équation classique (I-8), nous prenons en compte deux fois les pertes dans les UV (pour chacune des deux réflexions), alors que la double réflexion implique que ces pertes ne doivent être prises en compte qu'une seule fois (lors de la première réflexion), comme c'est le cas avec la méthode exacte. La différence d'intégration entre les deux méthodes est plus faible pour l'aluminium (0,86%) car sa réflectance spectrale est plus constante que celle de l'argent. Notons malgré tout que l'algorithme d'optimisation des épaisseurs des couches maximisant la réflectance solaire aboutit au même résultat indépendamment de la méthode de calcul de la réflectance solaire.

Deuxièmement la réflectance solaire plus élevée de l'argent par rapport à l'aluminium se conserve pour deux réflexions. Dans le cas de collecteurs solaires à double réflexion, l'argent semble donc être le choix le plus judicieux. Dans un collecteur solaire à double concentration, la surface du miroir secondaire est souvent bien plus petite que celle du miroir principal, alors que leur impact sur la performance solaire totale a le même poids. Il est donc judicieux d'utiliser des miroirs secondaires performants, même si leur coût est plus élevé que celui des miroirs primaires, car la surface nécessaire de miroirs secondaires est moins grande.

V. Réflexion de spectres solaires locaux

Dans la bibliographie et jusqu'à maintenant, nous avons calculé et optimisé les réflectances solaires en considérant le spectre solaire incident de référence mondiale ASTM G173-03 DC, utilisé dans plusieurs normes [66], [67]. En réalité, les applications solaires dépendent des conditions météorologiques locales (voir chapitre III). Nous avons donc dans ce paragraphe simulé en complément la réflectance solaire de cinq miroirs différents, en utilisant les spectres solaires locaux présentés dans le chapitre III.

Pour cela nous avons choisi les miroirs performants suivants, de structure simple pour faciliter la modélisation : un miroir composé d'une couche réflectrice d'argent seul (noté Ag), un miroir aluminium (noté Al), un miroir bicouche argent sur aluminium (noté Al/Ag) (voir §3.1, p.116), un miroir multicouche diélectrique à quatre bicouches $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ déposées sur argent (noté $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ sur Ag, Figure 60 gauche, p.127) et un miroir multicouche diélectrique

SiO₂/TiO₂ déposé sur verre (noté SiO₂/TiO₂ sur verre) (voir §3.3, p.125). Ces miroirs ont été choisis pour leurs réflectances solaires élevées ainsi que pour leur variété de composition (couches minces métalliques et diélectriques). Comme précédemment, les épaisseurs des diverses couches constitutives ont été optimisées pour maximiser la réflectance solaire, en tenant compte cette fois du spectre solaire local en plus du spectre de référence.

5.1. Spectres solaires locaux moyens

Nous avons tout d'abord utilisé les spectres solaires locaux moyens issus des six atmosphères réelles décrites au chapitre III (§3.2, p.98) pour les cinq miroirs. La Table 15 donne les réflectances solaires calculées à l'issue de l'optimisation des épaisseurs des miroirs, correspondant aux cinq miroirs choisis pour les six sites. Les valeurs sont comparées au cas de référence ASTM G173-03 DC, abrégé ici ASTM.

Table 15 : Réflectance solaire de miroirs optimisés en fonction de spectres solaires locaux moyens

	ASTM	Paranal	Ouarzazate	Montsec	Mezaira	Sandia	Brisbane
Ag	95,50%	95,18%	95,47%	95,76%	95,59%	95,55%	95,45%
Al	92,18%	92,28%	92,19%	92,22%	92,21%	92,21%	92,14%
Al/Ag	95,85%	95,66%	95,83%	96,02%	95,91%	95,89%	95,81%
MgF ₂ /TiO ₂ sur argent	97,60%	97,55%	97,60%	97,64%	97,61%	97,61%	97,59%
SiO ₂ /TiO ₂ sur verre	94,57%	94,37%	94,57%	94,55%	94,45%	94,54%	94,68%

On observe que de façon générale les valeurs de réflectance solaire obtenues sont toutes relativement proches de celle calculée avec le spectre solaire ASTM G173-03 DC. Pour un même miroir, une différence inférieure à 0,4% est observée entre les différents sites, et ce même pour un spectre solaire local issu des conditions très particulières de Paranal (site d'altitude dans le désert Chilien à fort ensoleillement (1040 W/m²) et faible absorption atmosphérique). La conclusion est identique en incluant une couche de protection (voir §4.1, p.130) et/ou une rugosité (voir §4.2, p.134) sur les miroirs solaires, ces résultats ne sont donc pas montrés ici.

Si l'on compare les comportements des différents miroirs, la réflectance solaire de l'aluminium seul est moins impactée par un spectre solaire local que celle de l'argent. Par exemple on note une diminution de la réflectance solaire de 0,1% entre le spectre de référence et le spectre solaire de Paranal, contre une réduction de 0,32% pour l'argent entre les mêmes spectres. Le bénéfice de réflectance solaire amené par un miroir bicouche Al/Ag par rapport à un miroir monocouche semble plus important pour certains sites, comme celui de Paranal.

Les différences de réflectance solaire observées avec les différents spectres solaires peuvent être expliquées par une différence de la part de densité de flux disponible aux courtes longueurs d'onde (< 400 nm) par rapport au spectre solaire complet (280 à 2500 nm) (Table 16). C'est en effet dans ce domaine de longueurs d'onde qu'à la fois les différences de réflectance spectrale des divers miroirs sont les plus marquées (Figure 53 p.120 et Figure 57), et les spectres solaires locaux eux-mêmes présentent des disparités importantes (Table 16). Ainsi on observe que les spectres solaires locaux qui ont la plus grande différence de densité de

flux dans les UV par rapport au spectre ASTM, en particulier celui de Paranal, sont également ceux qui correspondent aux plus grandes disparités dans l'évaluation de la réflectance solaire des miroirs (Table 15).

Table 16 : Part des densités de flux de 280 à 400 nm par rapport au spectre solaire complet (250 à 2500 nm) pour les 6 sites avec spectres moyens

ASTM	Paranal	Ouarzazate	Montsec	Mezaira	Sandia	Brisbane
3,89%	4,78%	3,97%	3,24%	3,64%	3,81%	3,96%

Ainsi, l'indice UV utilisé dans les prévisions météorologiques peut par exemple être un indicateur pour l'écart de performance des miroirs solaires par rapport à la référence ASTM G173-03 DC.

5.2. Spectres locaux avec suivi annuel de l'irradiance spectrale

Non seulement l'atmosphère locale (donc le lieu d'installation de la centrale) modifie le spectre solaire incident par rapport au spectre de référence mondiale, mais les variations annuelles locales (journée et saisons) ont également un fort impact sur les spectres solaires. Dans un second temps nous avons donc utilisé la base de données de spectres intégrant le suivi annuel de l'irradiance spectrale (voir chapitre III §3.3, p.102), sur laquelle nous disposons pour 8 sites répartis sur le globe de plusieurs milliers de spectres solaires modélisés à partir des conditions atmosphériques enregistrées sur une année complète [94]. Des spectres solaires représentatifs de chaque site ont été calculés à partir de ces données et sont présentés en détail dans le chapitre III.

Nous pouvons calculer, pour chaque miroir étudié (optimisé préalablement pour le spectre solaire de référence), autant de valeurs de réflectance solaire que de spectres solaires disponibles sur une année pour chaque site, soit plusieurs dizaines de milliers. Chacune de ces nombreuses réflectances solaires est ensuite divisée par l'énergie correspondant au spectre solaire associé (irradiance du spectre en W/m² multipliée par l'intervalle de temps sur lequel ce spectre est valide, voir chapitre III §3.3, p.102). En effectuant ce calcul pour chacun des spectres solaires disponibles sur un an, on peut déterminer par sommation l'énergie totale que le miroir considéré réfléchit durant une année entière. En divisant cette valeur par l'énergie totale incidente pour chaque site (énergie totale correspondant à tous les spectres solaires d'un site sur l'année, en kWh/m²/an), nous avons déterminé la réflectance solaire annuelle de chaque miroir (Table 17).

Table 17 : Réflectance solaire annuelle pour les cinq miroirs en fonction du site

Spectre solaire / Miroir	Ag	Al	Al/Ag	MgF ₂ /TiO ₂ sur Ag	SiO ₂ /TiO ₂ sur verre
ASTM	95,50%	92,18%	95,85%	97,60%	94,57%
Palaiseau	95,93%	92,24%	96,14%	97,65%	94,44%
Ilorin	96,01%	92,28%	96,21%	97,61%	94,21%
Nauru	95,29%	92,03%	95,68%	97,54%	94,97%
Dakar	95,88%	92,20%	96,11%	97,59%	94,50%
Xianghe	96,50%	92,51%	96,58%	97,70%	93,66%
Sede Boker	95,72%	92,22%	96,00%	97,62%	94,50%
Solar Village	95,62%	92,24%	95,94%	97,60%	94,46%
Izana	95,37%	92,27%	95,78%	97,57%	94,46%
Moyenne	95,76%	92,24%	96,03%	97,61%	94,42%
± écart-type	± 0,37%	± 0,13%	± 0,27%	± 0,05%	± 0,35%
Ecart maximal (maximum – minimum)	1,21%	0,48%	0,90%	0,16%	1,31%

Nous observons que pour un miroir donné, les écarts entre la réflectance solaire annuelle obtenue à partir du spectre solaire de référence et celles calculées grâce aux spectres solaires issus des conditions locales sont plus importants que précédemment (Table 15). Cette fois encore, la réflectance solaire du miroir aluminium varie moins entre deux sites ($92,24 \pm 0,13\%$) que celle du miroir argent ($95,76 \pm 0,37\%$). Le miroir composé d'un empilement MgF₂/TiO₂ sur argent offre toujours une réflectance solaire supérieure à celle des autres miroirs ($97,61\%$). Celle-ci varie peu entre les différents sites comparativement aux autres miroirs avec un écart-type de 0,05% par rapport à la moyenne et un écart maximal de 0,16%. Pour d'autres miroirs, l'écart maximal de réflectance solaire entre les sites peut être supérieur à 1%. C'est par exemple le cas des miroirs argent (écart maximal de 1,21%) et SiO₂/TiO₂ sur verre (écart maximal de 1,31%). Le bénéfice apporté par le miroir bicouche Al/Ag est toujours visible quel que soit le site, avec une réflectance solaire annuelle ($96,03 \pm 0,27\%$) globalement supérieure à celle d'un miroir argent simple ($95,76 \pm 0,37\%$). Le gain de réflectance observé précédemment de 0,35% avec un miroir Al/Ag par rapport au miroir Ag seul, correspondant au spectre ASTM, s'avère supérieur pour certains sites (+ 0,39% pour Nauru et + 0,41% pour Izana). Ces deux sites contiennent en effet une plus forte part d'UV dans leurs densités de flux que le spectre ASTM (Table 18). Or, l'avantage d'un miroir Al/Ag par rapport à un miroir Ag seul est justement de pouvoir réfléchir également ces longueurs d'onde. Inversement pour Xianghe l'avantage d'un miroir Al/Ag est plus faible (+0,08) car le spectre de ce site contient très peu d'UV (1,7% contre 3,9% pour le spectre ASTM).

Table 18 : Part des densités de flux de 280 à 400 nm par rapport au spectre solaire complet (250 à 2500 nm) pour les 8 sites avec suivi annuel

ASTM	Palaiseau	Ilorin	Nauru	Dakar	Xianghe	Sede Boqer	Solar Village	Izana
3,89%	2,73%	2,56%	4,08%	2,75%	1,70%	3,27%	3,49%	4,06%

Les sites se prêtant le moins au CSP du fait de la faible irradiance solaire annuelle (Ilorin, Dakar, Palaiseau et Xianghe, voir chapitre III) correspondent aux meilleures réflectances solaires annuelles, quel que soit le miroir. En effet, comme vu précédemment, la part de leurs densités de flux aux courtes longueurs d'onde (UV, de 280 à 400 nm) est plus faible que celle des autres sites (Table 18). Moins le spectre contient d'UV, plus la réflectance solaire des miroirs est élevée car c'est pour ces longueurs d'onde que les réflectances spectrales des miroirs, notamment d'argent, sont les plus faibles. Comme pour Paranal, le site d'altitude d'Izana, pour lequel la part d'UV dans le spectre solaire est élevée, donne lieu à de moins bonnes performances pour les miroirs argent, qui ne réfléchissent pas ces longueurs d'onde. Les sites désertiques (Sede Boker, Solar Village) correspondent à des performances solaires proches de celles obtenues avec le spectre solaire ASTM. En effet, le spectre solaire ASTM contient un taux important d'UV dans sa densité de flux (3,9%) ce qui le rapproche des sites de Nauru, Sede Boquer et Solar Village. Le site de Nauru correspond systématiquement aux plus bas niveaux de réflectance solaire annuelle. En effet, sa part de densité de flux dans les UV est la plus importante de tous les sites (4,08%).

L'efficacité d'un miroir solaire dépend donc bien de son lieu d'installation. Les réflectances solaires calculées avec le spectre solaire de référence ASTM G173-03 DC sont représentatives, mais des écarts non négligeables peuvent exister, particulièrement pour des sites d'altitude (Paranal, Izana), des sites tropicaux (Nauru) ou des sites pollués (Xianghe). Il existe donc a priori une marge de progression possible pour l'optimisation des miroirs en fonction de ces conditions locales particulières, notamment pour ceux qui offrent un degré de liberté. Il n'est en effet pas possible d'influencer la réflectance de miroirs métalliques monocouches (réflectance fixée par l'indice de réfraction du métal), mais la réflectance de miroirs multicouches constitués de diélectriques peut être adaptée en jouant sur l'épaisseur des couches. Il paraît donc a priori possible d'adapter leur réflectance solaire aux conditions locales. Nous n'avons cependant pas encore effectué ce travail par manque de temps, la modélisation et l'optimisation d'un empilement $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ de 50 couches demandant un temps de calcul conséquent. De plus la Figure 62 gauche (p.129) montre que ce problème d'optimisation accepte plusieurs solutions au même problème. Il convient donc de maîtriser parfaitement le paramétrage de notre outil d'optimisation pour ce problème particulier, avant de conduire cette étude.

Rugosité des miroirs et spectres solaires locaux

Dans le paragraphe précédent, nous avons établi une corrélation entre les réflectances solaires des miroirs (Table 15, Table 17) et la part de la densité de flux des UV (280 à 400 nm) dans la densité de flux totale (de 280 à 2500 nm) des spectres solaires locaux (Table 16, Table 18). Au début de ce chapitre, nous avons également remarqué que la rugosité à la surface des couches réfléchissantes entraîne une réflexion spéculaire plus faible dans les courtes longueurs d'onde que dans les grandes longueurs d'onde (Figure 46, p.113). Nous avons donc calculé la part de réflexion spéculaire solaire dans la réflexion solaire totale d'un miroir idéal (100% de réflexion spéculaire lorsque la surface est parfaitement lisse) en fonction de la rugosité de surface du miroir, pour différents sites (Figure 73). L'absorptance due à un mélange entre la couche réfléchissante et l'éventuelle couche de protection (voir §4.1, p.130) n'est pas prise en

compte. La part de réflexion spéculaire est similaire pour tous les spectres solaires locaux. On observe une légère différence uniquement pour des états de surface trop rugueux pour obtenir des miroirs spéculaires performants (> 10 nm). En conclusion, malgré le fait que différents sites peuvent avoir des spectres solaires dont les taux d'UV sont différents, la limite de rugosité à respecter pour obtenir une réflexion spéculaire élevée est identique quel que soit le site.

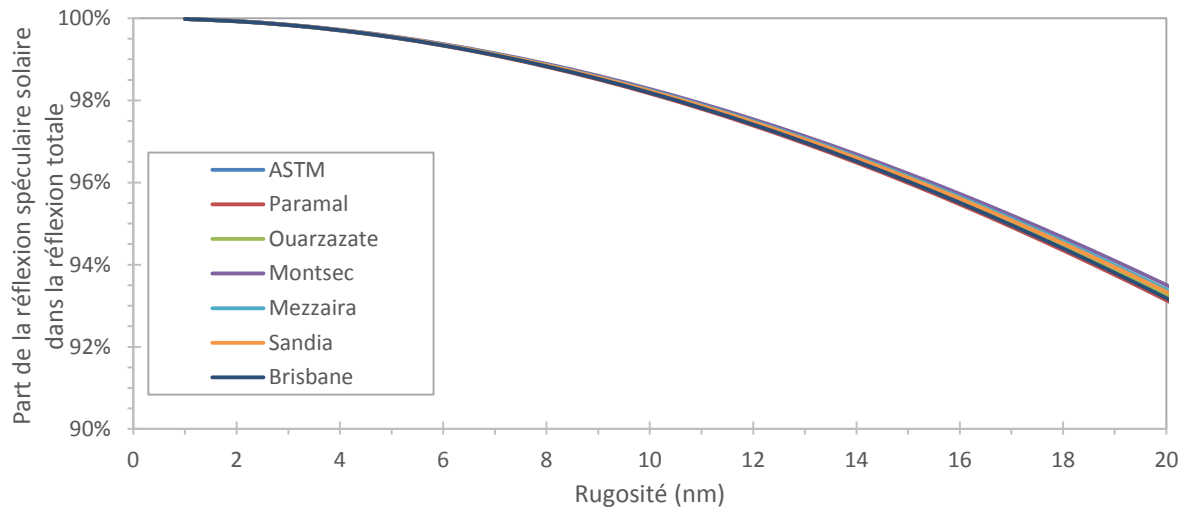


Figure 73 : Part de la réflexion solaire spéculaire par rapport à la réflexion totale en fonction de la rugosité

VI. Conclusion du chapitre IV

Les miroirs solaires sont les premières interfaces rencontrées par le rayonnement lors de sa conversion en énergie thermique. Les surfaces déployées dans les centrales CSP sont extrêmement importantes, de l'ordre de 8 à 10 m² de miroirs par kW électrique produit, soit par exemple 510 000 m² (195 hectares) pour une centrale de 50 MW_e (type Andasol). Il est donc important de s'intéresser aux voies possibles de réduction de coût et/ou d'amélioration de performance de ces miroirs. Théoriquement ce but peut sembler facile à atteindre : des couches d'argent parfaitement lisses et spéculaires, déposées dans des conditions d'élaboration maîtrisées, assureraient des réflectances solaires proches de 98,5% pour une épaisseur d'une centaine de nanomètres d'argent seulement, soit de l'ordre du gramme d'argent par m² de miroir. Cependant, de tels résultats ne peuvent être atteints qu'à l'aide de matériaux purs, sans aucune couche de protection ni rugosité de surface. Dans la réalité il est nécessaire de rajouter une couche de protection diélectrique (verre, oxyde, polycarbonate) limitant les dégradations physiques (rayures, etc.) et chimiques (corrosion). Cette couche de protection réfléchit et absorbe légèrement le rayonnement incident avant qu'il n'atteigne la couche réflectrice, et après réflexion sur celle-ci. La rugosité de surface, bien qu'elle puisse être relativement contrôlée par le procédé d'élaboration, est également difficile à éviter. Cette dernière peut en particulier causer la formation d'une couche intermédiaire métal/diélectrique (cermet) absorbante à l'interface entre une couche réflectrice métallique et la couche de protection diélectrique. Une

rugosité de surface élevée peut également faire augmenter la part de réflexion diffuse (non concentrable) dans le rayonnement réfléchi total. Ces divers phénomènes conduisent tous à une réduction de la réflectance solaire. Au final, les miroirs commerciaux affichent des performances proches de 93 à 93,5%, loin des 98,5% idéaux.

Notre travail nous a permis d'identifier plusieurs axes d'amélioration possible des performances des miroirs actuels. Des miroirs bicouches d'argent sur aluminium (Al/Ag) ont l'avantage de réduire par trois la quantité d'argent nécessaire tout en augmentant légèrement la réflectance solaire. Nous avons également démontré qu'il est possible d'obtenir des réflectances solaires élevées, proches de celles des métaux, avec un empilement multicouche uniquement composé de couples de diélectriques. Les épaisseurs des couches constitutives de l'empilement multicouche doivent alors être finement contrôlées. Un empilement optimisé de quatre bicouches $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ sur Ag donne par exemple accès à une réflectance solaire de 97,6%. Un empilement optimisé de 25 bicouches $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ sur verre (substrat très peu réflecteur $\sim 4\%$) a quant à lui une réflectance de 94,6%. La meilleure voie d'amélioration est sûrement une combinaison des deux méthodes : utiliser des substrats métalliques très réflecteurs comme l'argent et/ou l'aluminium, et y ajouter des empilements de diélectriques. Cela permet d'accroître la réflectance solaire de plusieurs pourcents par rapport aux solutions classiques. Leur coût de fabrication est cependant difficile à estimer, mais resterait a priori du même ordre de grandeur puisque des techniques de dépôt similaires à celles actuellement utilisées peuvent être envisagées pour ces solutions, et qu'aucun matériau trop exotique n'est nécessaire. Même si le prix de revient de ces miroirs était malgré tout élevé, ces derniers pourraient être utilisés comme réflecteurs secondaires (collecteurs solaires à double concentration tels que les technologies à Réflecteurs Linéaires de Fresnel et centrale à tour beam-down), pour lesquels les surfaces requises sont bien moindres que celles des réflecteurs primaires. Enfin, il faut garder en tête que même si le prix de revient des miroirs augmente par rapport à l'existant, l'augmentation notable des performances solaires de ces miroirs, donc de la production électrique globale des centrales, peut compenser le surcoût. Une étude technico-économique au cas par cas peut permettre de trancher cette question.

L'utilisation de couches de protection, notamment en verre épais (quelques mm), explique en grande partie les pertes de réflectance solaire entre un miroir brut et un miroir protégé. Une autre voie d'amélioration des performances consiste donc à trouver des solutions pour remplacer le verre. Les oxydes, notamment le SiO_2 en couche micrométrique, sont des candidats prometteurs. De telles couches sont en effet moins réfléchissantes et beaucoup moins absorbantes que le verre. Mais compte tenu des épaisseurs optimales proposées (quelques dizaines de microns), des études mécaniques et de vieillissement seront nécessaires pour valider ces solutions.

Enfin, l'analyse tenant compte des spectres solaires locaux montre la variabilité relative des performances solaires en fonction du site d'installation des miroirs, qui peut être de plusieurs pourcents de réflectance solaire. Nous remarquons une corrélation entre une densité de flux dans les UV élevée pour un site et une efficacité moindre des miroirs solaires sur ce site, les miroirs ayant généralement des réflectances spectrales plus faibles dans ces longueurs

d'onde, en particulier l'argent. Il semble délicat d'envisager l'optimisation des miroirs pour les spectres solaires locaux, sauf dans le cas des miroirs multicouches diélectriques.

Dans ce chapitre, notre logiciel d'optimisation nous a permis de suggérer des voies pour augmenter la réflectance solaire des miroirs de façon modérée mais significative. Nous allons maintenant appliquer les mêmes démarches dans le chapitre suivant, consacré à la transmittance solaire. La réflectance solaire, notre objectif d'optimisation dans le chapitre actuel, va devenir la fonction à réduire dans le chapitre V, afin de maximiser le flux solaire transmis à travers les vitres en verre pourvues de couches antireflet des collecteurs solaires.

Chapitre V

Fonction transmittance : verres et antireflets

I. Introduction du chapitre V

Ce chapitre concerne les surfaces et interfaces transparentes. Elles sont présentes, sous forme de vitres ou de tubes, dans la grande majorité des collecteurs solaires à concentration, à l'exception de certaines technologies utilisant une concentration 3D. Leur rôle principal est d'isoler thermiquement et/ou de protéger les autres éléments du collecteur solaire. Cependant, chaque élément transparent crée des pertes par absorption et des pertes par réflexion, dues à la différence d'indice de réfraction entre le(s) matériau(x) constitutif(s) de l'élément et le milieu ambiant. Pour limiter ces pertes, des couches minces antireflet transparentes sont déposées sur ces éléments. Dans le cas de l'énergie solaire thermique, elles doivent être spécialement adaptées, comme nous le verrons, afin de minimiser la réflectance sur le domaine spectral du soleil.

L'objectif de ce chapitre est donc d'identifier, d'étudier et d'optimiser via la simulation des couches minces antireflet spécifiquement dédiées aux collecteurs solaires thermiques. Ces solutions spécifiques sont nécessaires à une bonne transmission de la totalité du spectre solaire direct. Pour mener à bien cette étude, nous avons utilisé notre algorithme d'optimisation, présenté dans le chapitre II.

Après avoir identifié les besoins spécifiques aux applications solaires, nous allons rechercher et tenter d'optimiser des solutions de couches antireflet solaires. Parallèlement, nous chercherons à identifier grâce à la modélisation des solutions pouvant répondre aux problématiques exprimées par l'état de l'art. Par exemple, nous nous interrogerons sur le recours aux solutions d'antireflets solaires constitués de couches minces compactes, pour envisager ensuite un recours aux couches poreuses. Comme dans le chapitre précédent, nous nous focaliserons sur les effets liés à la rugosité des surfaces et la tolérance sur l'épaisseur des couches. Nous étudierons également l'effet de l'angle d'incidence du rayonnement, ou encore l'influence de la nature du substrat à travers différentes familles de verres et notamment de leur absorptance solaire. Le but est d'identifier et de quantifier les mécanismes qui pourraient réduire la transmittance solaire des couches antireflets. En fin de chapitre nous étudierons l'impact de la géométrie des collecteurs solaires et des spectres solaires locaux sur la transmittance solaire de solutions identifiées comme pertinentes.

II. Transmittance solaire

Ici, sur le principe de la loi de conservation de l'énergie, nous cherchons à maximiser la transmittance en minimisant l'absorptance et la réflectance d'un ensemble de couches minces déposées sur un substrat transparent. L'ensemble couche(s) mince(s)/verre doit constituer une interface très transparente afin de limiter les pertes de flux lumineux reçu dues à l'absorption et à la réflexion. Cette qualité s'obtient via l'usage de matériaux diélectriques transparents, comme des oxydes déposés en couches minces sur des substrats verres.

2.1. Problématique générale

Utilisation des interfaces transparentes dans les collecteurs solaires

Les interfaces transparentes sont présentes dans la majorité des collecteurs solaires à concentration, car elles permettent d'isoler thermiquement et/ou de protéger les éléments du collecteur comme les absorbeurs, et pour certains collecteurs, les miroirs. Par exemple dans la technologie GlassPoint® implantée dans le désert (voir chapitre I, §3.1 p.32), des collecteurs cylindro-paraboliques sont protégés du sable (donc de l'abrasion) et isolés du vent (donc des pertes par convection forcée) en les plaçant complètement sous serre. D'une façon générale, pour chaque surface/interface transparente utilisée dans un collecteur, il est indispensable de maximiser la densité de flux solaire transmise afin qu'elle soit maximale sur les interfaces suivantes, et notamment sur l'absorbeur thermique.

Cette problématique liée à la protection des systèmes est bien évidemment plus générale puisqu'elle touche d'autres domaines liés à la production ou l'économie d'énergie, ou la gestion de la luminosité, comme le photovoltaïque ou le bâtiment. Par exemple, il est important de protéger les cellules photovoltaïques de l'extérieur tout en réduisant la réflectivité non négligeable du verre et des cellules [149]. Dans le bâtiment, bénéficier des apports de lumière solaire gratuits à travers les vitrages permet de réduire la facture énergétique [150].

Dans l'ensemble de ces domaines d'application, les verres sont extrêmement utilisés grâce à leur faible coût, leur bonne transparence et leurs propriétés mécaniques adaptées [151]. Ces propriétés les conduisent par exemple à être utilisés pour protéger les couches réfléchissantes des miroirs solaires (voir chapitre IV, §4.1 p.130). Dans la bibliographie des collecteurs solaires, nous n'avons d'ailleurs trouvé qu'une seule interface transparente qui ne soit pas en verre : l'enveloppe gonflable des collecteurs Heliovis® faite de fluoropolymère [34] (voir chapitre I, §3.1 p.32).

Réflexion solaire des verres : rôle des couches minces antireflet

La principale problématique des verres, et plus généralement de tous les milieux transparents, est de réduire la réflexion due au changement d'indice de réfraction complexe entre l'air et le milieu traversé. Pour un verre nu, ce phénomène génère une perte non négligeable de la puissance lumineuse incidente. Cette perte est majoritairement due à la partie réelle (notée n) de l'indice de réfraction complexe ($N = n + ik$) du verre. Avec des valeurs comprises entre $n = 1,5$ et $n = 1,9$ les pertes par réflexion subies par le rayonnement solaire sont de l'ordre de 4 à 10% à chaque changement de milieu (air-verre ou verre-air). Pour un verre traversé par le rayonnement, ceci correspond donc à 8 à 20% de pertes dues à la double réflexion, aux interfaces air-verre (face avant) puis verre-air (face arrière) [150] (Figure 74).

A l'échelle d'une centrale solaire, de telles pertes ne sont pas acceptables car elles réduiraient fortement l'énergie électrique produite, surtout si plusieurs composants en verre sont utilisés. Il est donc impératif de limiter la réflexion de chaque face de verre rencontrée par le rayonnement incident, ce qui passe par l'emploi de couches antireflet (abrégées CAR dans la suite). Le revêtement antireflet pourra être constitué d'une ou plusieurs couches minces

déposées à la surface du verre employé. Ce type de solution est largement développé dans l'industrie : lunetterie [152], bâtiment [153], écrans [154], lasers [155], stockage de données [156], etc.

Absorption solaire des verres

Pour garantir une forte transmission solaire, non seulement la densité de flux solaire incidente ne doit pas être réfléchi par le verre, mais elle ne doit pas non plus être absorbée par ce dernier. Il est donc nécessaire que le coefficient d'extinction (k) du verre employé, mais aussi des couches minces utilisées comme couches antireflet, soient faibles voire nuls sur un large domaine de longueurs d'onde correspondant au spectre solaire. C'est le cas pour la grande majorité des verres ainsi que des matériaux pour couches minces antireflet utilisés pour ces applications [157].

L'absorptance solaire (notée A_s) des verres n'est pas nulle car les vitres ou tubes protecteurs sont souvent épais de quelques millimètres, mais elle reste faible : par exemple, $A_s = 0,48\%$ pour 1 mm de verre BK7[®] sur le spectre solaire complet de 280 à 4000 nm [138]. Le choix du domaine spectral du spectre solaire utilisé pour le calcul a une influence, car l'absorptance solaire du verre BK7[®] de 1 mm diminue à 0,27% pour un intervalle spectral de 280 à 2500 nm. Pourtant ce domaine spectral restreint est celui recommandé pour la caractérisation de surfaces solaires (norme ISO 9050 et ISO 9845 [68], [67]). En effet, si la mesure de propriétés optiques jusqu'à 2500 nm peut s'effectuer par spectrophotométrie UV-visible-proche infrarouge, la mesure au-delà de 2500 nm requiert de faire appel à la spectrophotométrie infrarouge et un deuxième appareillage coûteux est alors nécessaire. C'est pourquoi les normes préconisent de s'arrêter à 2500 nm.

L'absorptance solaire est proportionnelle à l'épaisseur du milieu traversé. Bien que ces pertes par absorption soient problématiques, les couches minces n'offrent pas de solution pour les limiter, car elles sont intrinsèques à la qualité et à la composition des verres, notamment leur taux de fer. Pour cette raison la bibliographie et les fabricants de verres parlent souvent de verre à faible teneur en fer pour désigner des verres très transparents [158].

Conclusion sur la problématique de transmittance solaire

Au final, pour notre travail, la principale problématique liée à l'usage des verres pour l'énergie solaire est la réflexion du rayonnement à chaque interface entre deux milieux rencontrée. Cette réflexion est majoritairement due à la partie réelle (n) de leur indice de réfraction complexe (N). Nous allons donc nous intéresser à la simulation et à l'optimisation de différentes solutions couches minces antireflet solaires, qui permettent de fortement réduire ces réflexions parasites. Dans un second temps, nous commenterons l'influence de l'absorptance solaire des verres eux-mêmes, qui peut être limitée non pas par des solutions couches minces mais seulement en choisissant des verres peu absorbants.

2.2. Définitions et sources

Nous détaillerons rapidement quelques principes théoriques nécessaires à la compréhension et à l'obtention des résultats de ce chapitre. Rappelons que notre outil de simulation des performances solaires passe par le calcul des réflectance, transmittance et absorptance spectrales des surfaces à partir des indices de réfraction complexes des divers matériaux, via la méthode de la matrice de transfert détaillée dans le chapitre II (§3.1p.72) [71], [72].

Transmittance solaire pour une et deux faces

Idéalement, il faut considérer la transmittance solaire de la totalité de l'interface transparente, qui quantifie la proportion de rayonnement sortant après le passage du rayonnement incident depuis l'air ambiant au travers de la première couche antireflet, puis du verre, puis de la deuxième couche antireflet, vers l'air à nouveau. En considérant des couches antireflet (CAR) identiques de part et d'autre du verre, le système CAR/verre/CAR devient symétrique. Considérons ce système comme un seul bloc au contact de l'air, soit seulement deux interfaces, air/système et système/air (Figure 74). Comme le système est symétrique, la réflectance $R(\lambda)$ du rayonnement incident est la même à ces deux interfaces. Nous appellerons cette grandeur la « réflectance une face ». Ainsi, après une première réflexion $R(\lambda)$ à l'interface air/système, le rayonnement incident traverse l'interface et pénètre dans le système. La proportion de rayonnement transmis à travers l'interface est la « transmittance par face » notée $T(\lambda)$. Ce rayonnement est ensuite réfléchi à la seconde interface système/air selon la même réflectance $R(\lambda)$. Finalement, le rayonnement transmis par le système complet est donc $T_2(\lambda)$, qui correspond à la « transmittance deux faces ». Par intégration de ces grandeurs spectrales, nous pouvons déduire les grandeurs solaires que sont la « réflectance solaire par face » R_s , « la transmittance solaire par face » T_s et la « transmittance solaire deux faces » T_{s-2} , selon l'équation (V-1) (Figure 74).

$$T_{s-2} = T_s - R_s \cdot T_s \quad (V-1)$$

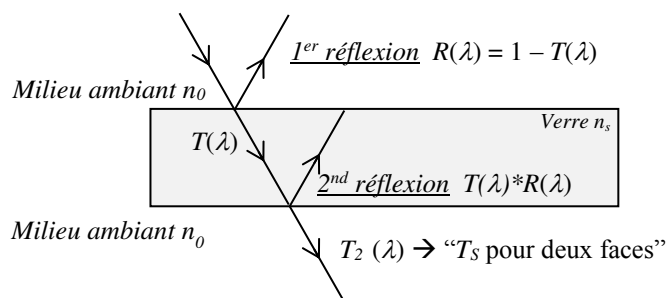


Figure 74 : Réflexion aux deux interfaces d'un verre et transmittance deux faces pour la structure CAR/verre/CAR

Indices de réfraction complexes des matériaux

Pour nos travaux de simulation et d'optimisation des surfaces transparentes, les indices de réfraction complexes des matériaux utilisés pour les couches antireflet sont nécessaires. Ils ont été directement extraits de publications scientifiques [144], [133] ou de la base de données "refractiveindex.info" [157] recensant de nombreuses sources. Nous avons interpolé et parfois extrapolé ces données discrètes sur la gamme solaire (typiquement de 280 à 2500 nm par pas de 5 nm) pour permettre le calcul des performances solaires.

Pour les verres, les indices de réfraction complexes sont également requis. Dans ce cas nous avons travaillé uniquement avec les données du catalogue de verres Schott [138]. Ce catalogue contient en effet tous les types de verres couramment utilisés et l'utilisation d'une seule base de données augmente la cohérence des résultats. Les données sont fournies avec un nombre élevé de points à intervalles réguliers et les coefficients d'extinction sont donnés avec une précision allant jusqu'à 10^{-9} . Enfin, de nombreuses informations complémentaires sont également disponibles dans cette base : nombre d'Abbe, propriétés mécaniques, densité, dispersion chromatique, etc.

L'équation de Sellmeier propose une relation empirique entre l'indice de réfraction réel (n) d'un milieu transparent et la longueur d'onde (λ). Cette formule peut s'adapter au milieu étudié grâce à deux paramètres (B et C) déclinés trois fois (indices 1, 2 et 3).

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \quad (\text{V-2})$$

Pour les verres nous privilégierons cette équation pour obtenir l'indice de réfraction aux longueurs d'onde souhaitées (de 280 à 2500 nm par pas de 5 nm), plutôt que d'interpoler les valeurs discrètes. Le nombre important de chiffres significatifs des paramètres B et C (de 8 à 10 chiffres) disponibles dans la base de données Schott permet d'avoir une grande précision sur le calcul de n . Les valeurs du coefficient d'extinction k des verres sont quant à elles interpolées linéairement sur la gamme solaire.

Une fois les indices de réfraction complexes des matériaux en notre possession et convenablement traités, nous pouvons calculer la réflectance, la transmittance et l'absorptance spectrales de systèmes constitués de verres avec couches antireflet via la méthode de transfert de matrices, afin de déduire leur transmittance solaire.

III. Antireflets solaires monocouches

Nous commencerons par nous intéresser aux couches antireflets composées d'une seule couche. Ce cas est le plus fréquent et le plus simple à mettre en œuvre [72]. Tentons d'optimiser grâce à l'algorithme présenté dans le chapitre II quelques exemples de monocouches dans le but de maximiser la transmittance solaire deux faces (équation (V-1)). Sauf précision contraire,

nous utiliserons pour le calcul le spectre solaire de référence mondiale ASTM G173-03 Direct et Circumsolaire (DC) [81].

3.1. Éléments de théorie pour les antireflets monocouches

Nous regrouperons ici les quelques éléments de théorie nécessaires à la compréhension des antireflets monocouches destinés à l'énergie solaire thermique.

Un effet antireflet peut s'obtenir grâce à l'ajout d'une couche mince d'une épaisseur de l'ordre de la longueur d'onde incidente (centaine de nm) (Figure 75). De multiples réflexions ont lieu dans la couche aux interfaces avec l'air et le substrat. Le rayonnement total réfléchi par la surface vers l'air est la combinaison de ces divers rayons réfléchis. Il est possible de créer dans certaines conditions des interférences destructives, de sorte que le rayonnement total réfléchi soit minimal, voire nul.

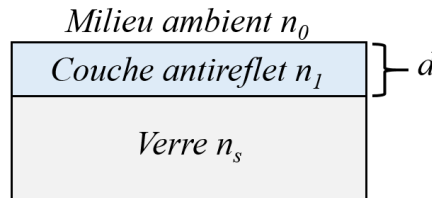


Figure 75 : Architecture (une face) d'une CAR monocouche sur un verre

Un simple développement mathématique des coefficients de Fresnel démontre que pour obtenir un effet antireflet, l'indice de réfraction de la couche mince (noté n_1) doit avoir une relation particulière avec celui du substrat (noté n_s) et celui du milieu ambiant (noté n_0). Cette relation est donnée par l'équation (V-3).

$$n_1 = \sqrt{n_s \cdot n_0} \quad (\text{V-3})$$

Ce développement n'est valide que si l'on suppose que le coefficient d'extinction k soit nul pour le verre et le matériau de la couche, et que le rayonnement soit à incidence normale. Avec cette valeur idéale pour n_1 nous obtenons une réflexion parfaitement égale à zéro pour une longueur d'onde particulière, notée λ_0 (minimum de réflexion). Cette longueur d'onde est donnée par une simple relation entre n_1 et l'épaisseur de la couche, notée d (équation (V-4)).

$$d \cdot n_1 = \lambda_0 / 4 \quad (\text{V-4})$$

Le rapport quatre entre la longueur d'onde et l'épaisseur conduit au nom de « lame quart d'onde » pour les monocouches antireflet.

Nous avons étudié et illustré l'impact des deux précédentes équations sur la réflectivité d'un verre théorique recouvert d'une couche antireflet. L'indice de réfraction du verre ($n_s = 1,5$) est considéré uniquement réel ($k = 0$, verre non absorbant) et constant quelle que soit la longueur d'onde. La Figure 76 illustre la réflectivité par face de différentes couches antireflet déposées sur le verre théorique, pour différentes valeurs de l'indice de réfraction de la couche mince (n_1 , lui aussi considéré constant avec la longueur d'onde) respectant (courbes vertes, $n_1 = \sqrt{1,51} \approx 1,23$) ou ne respectant pas (courbes rouges, $n_1 = 1,15$ ou $1,37$) la condition d'idéalité (équation

(V-3)). Pour les courbes rouges et la courbe verte en trait plein, l'épaisseur de la couche est $d = 102$ nm, correspondant à l'épaisseur idéale pour obtenir une réflectivité nulle à $\lambda_0 = 500$ nm avec n_1 idéal à 1,23, selon l'équation (V-4).

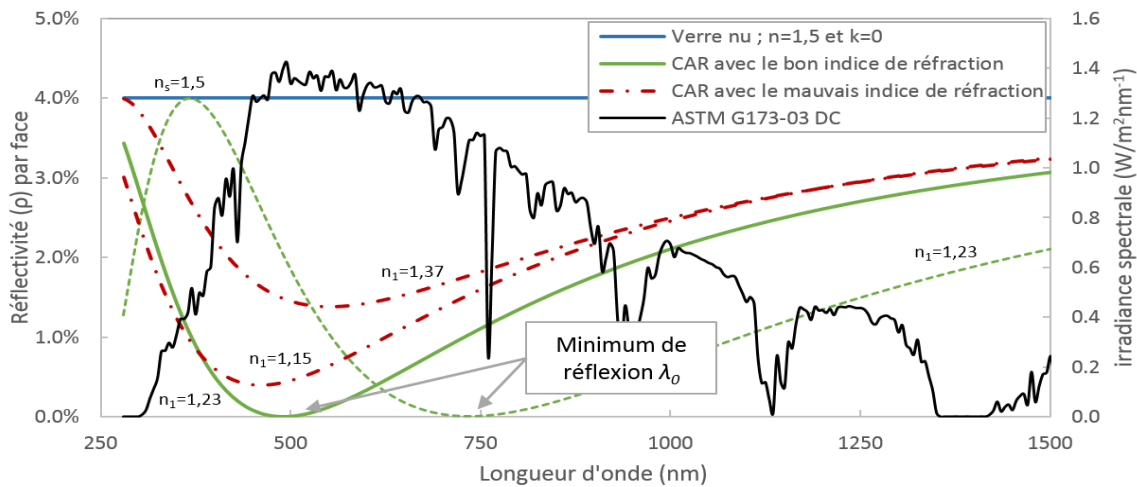


Figure 76 : Réflectivité (ρ) par face pour un verre ($n = 1,5$; $k = 0$) avec des couches antireflets d'indices différents

Le verre nu a une réflectivité (pour une face) d'environ 4% (courbe bleue). Quel que soit l'indice n_1 de la couche, la réflectivité du système verre/CAR est toujours inférieure à celle du substrat nu, et elle présente un minimum à une longueur d'onde donnée λ_0 , qui varie selon l'indice n_1 car l'épaisseur d de la couche est fixée (équation (V-4)). Un indice de réfraction n_1 supérieur (1,37) ou inférieur (1,23) à la valeur idéale recherchée (1,23) pour ce substrat ne permet pas d'atteindre une réflectivité nulle (courbes rouges). Seule la valeur d'indice de réfraction idéale (courbe verte en pointillés) donne lieu à une réflectivité nulle à la longueur d'onde λ_0 . Le contrôle de l'épaisseur de la couche (d) permet de placer le minimum de réflexion à la longueur d'onde souhaitée (λ_0), conformément à l'équation (V-4). Par exemple, une épaisseur de couche $d = 102$ nm donne $\lambda_0 = 500$ nm (courbe verte pleine) et une couche d'épaisseur $d = 153$ nm donne un minimum de réflexion à $\lambda_0 = 750$ nm (courbe verte en pointillés). En énergie solaire, le choix judicieux de cette longueur d'onde de réflexion minimale/nulle permettra de maximiser la transmittance solaire, c'est-à-dire la densité de flux incident (W/m^2) transmis par la surface transparente (vitre ou tube).

Au-delà des considérations sur les indices et épaisseurs idéales des antireflets, le choix du verre lui-même est à prendre en considération. En effet, dans la pratique, il peut s'avérer difficile de trouver des matériaux présentant les indices de réfraction idéaux recommandés par l'équation (V-3), typiquement 1,23 pour un verre d'indice 1,5. Pour faciliter la tâche, on pourrait envisager d'utiliser des verres présentant des indices de réfraction plus élevés que 1,5 (par exemple $n_s = 1,9$) afin que les couches antireflet puissent respecter l'égalité (V-3). Mais cette méthode serait en fait contreproductive en énergie solaire. En effet, lorsque l'on s'éloigne du minimum de réflexion (à λ_0) obtenu avec une couche antireflet, la réflectivité du verre avec couche antireflet tend vers celle du verre nu (Figure 76). La valeur maximale de réflectivité du verre revêtu dépend de l'indice de réfraction du verre, il est donc nécessaire que ce dernier soit le plus bas possible. La Figure 77 illustre ce fait.

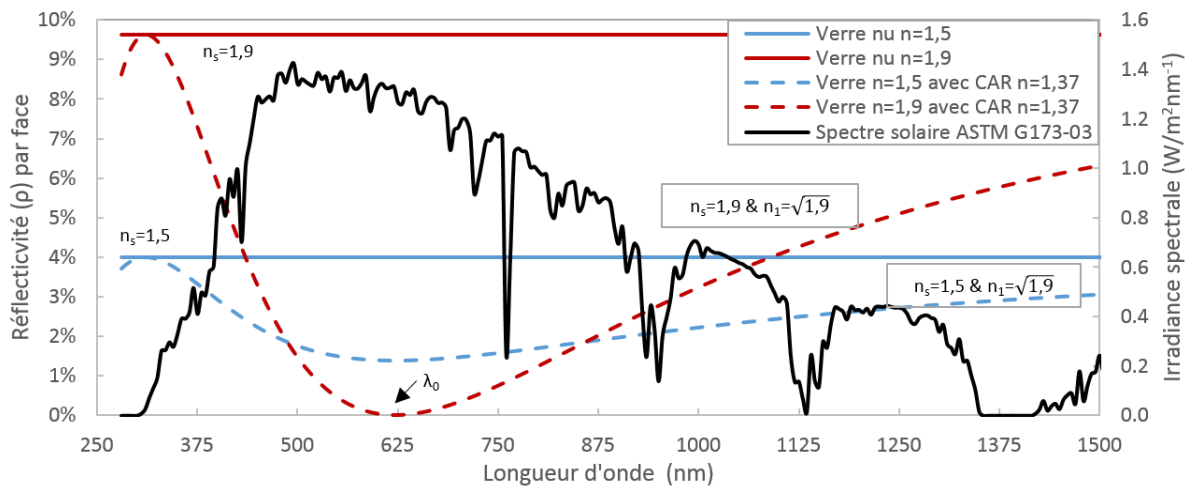


Figure 77 : Réflectivité spectrale par face pour deux verres d'indice de réfraction différents, avec et sans CAR

Dans l'exemple traité sur la Figure 77, les épaisseurs des couches antireflets sont optimisées pour obtenir un minimum de réflexion à $\lambda_0 = 620$ nm. Nous observons que la réflectivité du verre d'indice $n_s = 1,9$ revêtu d'une couche antireflet d'indice optimal $n_l = \sqrt{1,9} \approx 1,37$ (courbe rouge en pointillés) est inférieure à celle du verre nu d'indice $n_s = 1,9$ (courbe rouge en trait plein), mais elle devient supérieure à celle du verre nu d'indice $n_s = 1,5$ (courbe bleue en trait plein) lorsque l'on s'éloigne du minimum de réflexion (à λ_0). De plus, la réflectivité du verre d'indice $n_s = 1,5$ avec une couche antireflet non adaptée pour ce verre ($n_l = 1,37$; courbe bleue en pointillés), est globalement inférieure à celle du verre d'indice $n_s = 1,9$ avec la même couche antireflet d'indice $n_l = 1,37$, bien que celle-ci soit idéalement adaptée pour ce verre (courbe rouge en pointillés), et malgré le fait qu'un minimum de réflexion nul ne puisse être atteint dans le premier cas. Cette observation est confirmée par le calcul de la transmittance solaire deux faces : pour le verre d'indice $n_s = 1,5$ avec une couche antireflet d'indice $n_l = 1,37$ elle est de 95,8%, tandis que pour le verre d'indice $n_s = 1,9$ avec une couche antireflet d'indice idéal $n_l = \sqrt{1,9} \approx 1,37$ elle est de 94,7%. Ainsi, pour réduire la réflexion et augmenter la transmittance solaire d'un système verre avec couche antireflet, il est préférable dans tous les cas de choisir un verre d'indice le plus faible possible, même s'il est plus difficile de trouver un matériau d'indice adéquat pour la couche antireflet. En effet, l'utilisation d'un matériau antireflet non idéal sur un verre d'indice faible garantit malgré tout une transmittance solaire plus élevée que celle d'un verre d'indice plus grand avec un antireflet idéal.

3.2. Matériaux pour les antireflets monocouches

L'équation (V-3), donnant l'indice de réfraction idéal du matériau en couche mince garantissant un effet antireflet sur le substrat considéré, définit à elle seule les matériaux les plus adéquats pour les monocouches antireflet. Nous allons détailler ici ces matériaux compatibles, en distinguant les matériaux denses puis les matériaux poreux.

Matériaux denses

Les verres présentant en général des indices de réfraction de l'ordre de $n_s \approx 1,5$, il est nécessaire que les matériaux antireflet aient des indices de réfraction proches de $n_I = 1,23$. Or, ces valeurs d'indice faibles n'existent pas naturellement. Les matériaux connus s'approchant le plus de cette valeur idéale sont les fluorures, par exemple MgF_2 ($n \approx 1,38$ à 600 nm) [133], [159]. Certains polymères organiques pourraient théoriquement avoir des indices de réfraction de l'ordre de $n \approx 1,29$ à 589 nm [160], mais leur application sous hauts flux solaires n'est pas envisageable car les polymères organiques seraient fortement dégradés par ces derniers.

Matériaux poreux

Afin d'atteindre des indices de réfraction très bas, plus adéquats pour les couches antireflets, une des voies étudiées est l'utilisation de couches minces poreuses [161]. Un milieu poreux peut être considéré comme le mélange d'un matériau solide et d'inclusions d'air ou de vide à l'échelle nanométrique. Ceci peut être modélisé à l'aide des EMA (Effective Medium Approximation, sommairement une loi de mélange) présentés dans le chapitre I (§5.4, p.58) [74]. L'air ayant un indice très faible ($n = 1$), son incorporation dans un matériau dense donne un matériau poreux dont l'indice effectif (global) est plus faible que celui du matériau dense. Idéalement, afin de limiter la porosité du mélange et donc d'améliorer sa tenue mécanique, il est nécessaire de choisir comme matrices des matériaux denses présentant des indices de réfraction naturellement bas, si possible proches de l'optimum recherché ($n_I = 1,23$ pour un verre $n_s = 1,5$). Il est de plus nécessaire que les matériaux soient transparents au spectre solaire ($k = 0$ quelle que soit la longueur d'onde). Les matériaux diélectriques peuvent satisfaire ces besoins. Le SiO_2 poreux est par exemple très largement abordé dans la bibliographie. Il est le sujet de nombreuses recherches sur les antireflets solaires [149], [52]. Son indice de réfraction est inférieur à 1,5 sur le domaine du spectre solaire [144]. Son principal avantage est son excellente compatibilité avec le verre, car le verre est également majoritairement composé de SiO_2 . On peut retenir par exemple pour l'élaboration de couches de type SiO_2 poreux les méthodes de dépôt par sol-gel, principalement à base du précurseur TEOS (OrthoSilicate de TétraEthyle, $\text{SiC}_8\text{H}_{20}\text{O}_4$), qui permettent d'obtenir directement une couche poreuse [162] (Figure 78), ou le dépôt direct de nanoparticules de SiO_2 contenues dans une solution sol-gel [163] (Figure 79). Le dépôt par sol-gel peut être réalisé en immergeant les pièces de verre dans un bain (dip-coating), ce qui permet de traiter rapidement de grandes surfaces [161], [164].

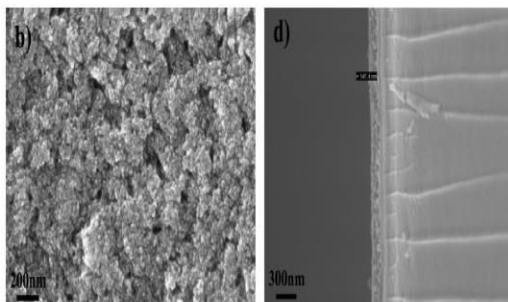


Figure 78 : Dépôt d'une CAR SiO_2 poreux par dip-coating [162]

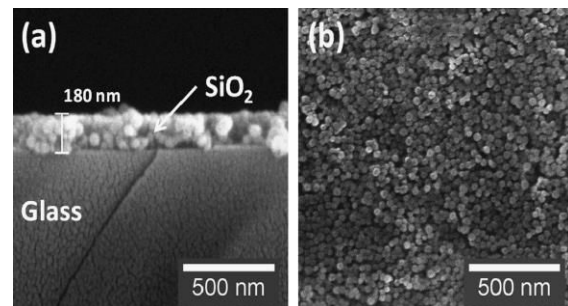


Figure 79 : Dépôt de nanoparticules de SiO_2 sur verre créant une CAR poreuse [163]

La bibliographie indique qu'il est difficile d'obtenir des porosités élevées de manière simple [165]. Pour obtenir ces dernières, il est nécessaire de recourir à des solutions contenant un surfactant et à une évaporation supercritique du solvant (500°C pendant 30 min), souvent très volatile (éthanol ou méthanol) [165], [166]. Cela permet d'obtenir des solides extrêmement poreux, jusqu'à 99%. Ces solides, nommé aérogels, sont couramment utilisés dans d'autres domaines [167]. Bien que plus rares, nous avons également relevé des cas de MgF_2 poreux utilisé comme antireflet, toujours fabriqué par une méthode sol-gel [168].

Antireflets texturés

Il existe d'autres méthodes pour obtenir des propriétés antireflet. La texturation de surface en est une. Celle-ci peut être bioinspirée, imitant les yeux des insectes (Figure 80) [169]. Il est possible grâce à une structuration sub-micrométrique (Figure 81) d'assurer des propriétés antireflet et même autonettoyantes par effet hydrophobique ou hydrophilique [169]. De nombreuses recherches et différentes techniques de dépôts (lithographie et électrospinning par exemple) visent à reproduire ces motifs qui permettent d'augmenter la transmittance tout en diminuant la fréquence des nettoyages [170].

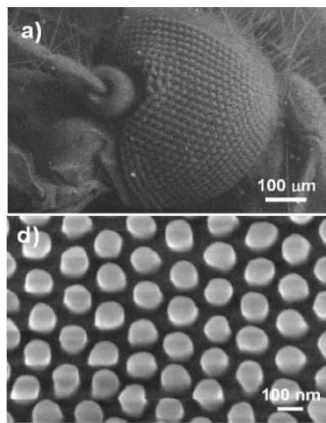


Figure 80 : Photographie MEB des yeux d'un moustique [169]

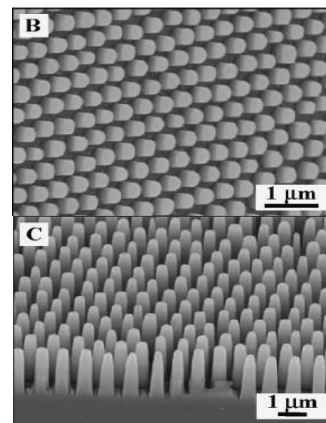


Figure 81 : Antireflet autonettoyant recréé par lithographie [171]

Bien qu'elles semblent prometteuses, nous avons écarté ces solutions dans notre étude. D'une part, la bibliographie étudie principalement le domaine du spectre visible (380 – 780 nm) [171], sans garantie de performances sur le spectre solaire complet. D'autre part, le phénomène antireflet correspondant ne peut pas être modélisé simplement par la méthode des matrices de transfert que nous utilisons. Il aurait été nécessaire de résoudre directement les équations de Maxwell spatialement à l'aide par exemple d'une méthode FDTD (Finite Difference Time Domain) [172], ce qui sortait du cadre de cette thèse.

3.3. Transmittance solaire des antireflets monocouches

A l'aide des outils décrits dans le chapitre II, nous avons modélisé et optimisé des antireflets monocouches. Le but est d'identifier les performances limites puis les meilleures solutions permettant de maximiser le flux solaire transmis par un verre revêtu. Notre substrat de référence est le verre BK7[®] Schott d'épaisseur 1 mm. Pour limiter le temps de calcul, la simulation ne prend en compte qu'une face du verre (Figure 75, p.158). La transmittance solaire deux faces est déduite des performances par face selon l'équation (V-2), p.157.

Transmittance solaire maximale d'un verre avec antireflet monocouche idéal

Nous avons tout d'abord calculé la transmittance solaire deux faces maximale qui peut être obtenue avec cette solution monocouche, en considérant que la couche mince antireflet est constituée d'un matériau « théorique » idéal.

Nous utilisons pour le calcul l'indice de réfraction complexe du verre BK7[®], qui varie en fonction de la longueur d'onde et dans lequel le coefficient d'extinction k_s est non nul (le verre n'est pas parfaitement transparent). Le matériau de la couche antireflet est quant à lui considéré comme parfaitement transparent ($k_l = 0$), et respecte à toutes les longueurs d'onde l'égalité (V-3), soit $n_1(\lambda) = \sqrt{n_s(\lambda)}$. Il s'agit donc du matériau idéal pour servir d'antireflet au verre BK7[®]. Nous obtenons ainsi une transmittance solaire deux faces de 97,24%, qui est le maximum théorique pour le verre BK7[®] avec antireflet monocouche.

Notons que l'absorptance solaire du verre BK7[®] est de 0,48%. La réflexion résiduelle, $R_s = 1 - T_s - A_s = 2,28\%$, est due au fait qu'il n'est pas possible d'obtenir un minimum de réflexion à toutes les longueurs d'onde, car la position de ce minimum, λ_0 , est fixée par l'épaisseur d de la couche antireflet (équation (V-4)). Afin de maximiser la transmittance solaire, l'optimisation tend en toutes circonstances à fixer la longueur d'onde du minimum de réflexion λ_0 à 610 nm pour le spectre solaire ASTM G173-03 Direct et Circumsolaire (DC). L'épaisseur idéale de la couche antireflet d'indice idéal est alors de 124,8 nm.

Transmittance solaire réelle d'un verre avec antireflet monocouche

Afin de se rapprocher du cas réel, nous considérons cette fois les indices de réfraction complexes réels de différents matériaux pour la couche antireflet : oxydes transparents (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO) et fluorures (MgF_2 , CaF_2). La couche mince présente une porosité variable afin d'adapter son indice de réfraction, et est déposée sur un verre BK7[®] ($n_s \approx 1,51$) de 1 mm d'épaisseur. L'épaisseur et la porosité de la couche sont optimisées pour maximiser la transmittance solaire deux faces. Un extrait des résultats simulés est présenté dans la Table 19. A titre de comparaison, le cas d'une couche dense (non poreuse) de MgF_2 d'épaisseur optimisée est également montré. La Figure 82 illustre la comparaison entre la réflectance spectrale par face pour un verre BK7[®] avec une couche antireflet MgF_2 dense et une couche SiO_2 poreuse optimisées pour le spectre solaire de référence ASTM G173-03 DC (Table 19).

Nous observons que les épaisseurs optimisées des couches poreuses sont toutes identiques, quel que soit le matériau (Table 19, colonne 3). L'épaisseur de 124,8 nm positionne en effet le minimum de réflexion à la longueur d'onde de 610 nm, qui permet de maximiser la transmittance solaire du spectre ASTM G173-03 DC (Table 19). La porosité optimale (Table 19, colonne 4) varie quant à elle en fonction du matériau de la CAR, de sorte que l'indice de réfraction du matériau poreux résultant (Table 19, colonne 5) diminue par rapport à celui du matériau dense (Table 19, colonne 2) et se rapproche de l'indice idéal pour le verre ($n_l \approx 1,23$). Ainsi les valeurs d'indice optimales sont identiques quel que soit le matériau (Table 19, colonne 5). La porosité de la CAR est le paramètre qui sert à ajuster cet indice selon le matériau utilisé. Cet indice peut être bien plus bas pour une couche poreuse que pour une couche dense, donnant

accès à une réflectance plus faible et un minimum de réflexion nulle dans le premier cas (Figure 82, courbe verte).

Table 19 : Transmittance solaire deux faces et absorptance solaire obtenues avec différentes CAR d'épaisseur et de porosité optimisées pour 1 mm de verre BK7®

Matériaux		Paramètres optimisés			Performances solaires		
Matériau CAR	$n(600\text{ nm})$ matériau dense	Épaisseur CAR optimisée	Porosité CAR optimisée	$n(600\text{ nm})$ CAR	T_s 2 faces Verre+CAR	A_s Verre+CAR	A_s CAR
MgF ₂	1,378 [133]	110, 7 nm	0%	1,378	95,44%	0,48 %	$6,8 \cdot 10^{-18}$
MgF ₂	1,378 [133]	124,8 nm	37,8%	1,231	97,23%	0,48%	$4,7 \cdot 10^{-18}$
CaF ₂	1,433 [173]	124,8 nm	45,4%	1,231	97,23%	0,48%	$6,8 \cdot 10^{-19}$
SiO ₂	1,473 [144]	124,8 nm	49,7%	1,231	97,23%	0,48%	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Al ₂ O ₃	1,679 [128]	124,8 nm	62,2%	1,231	97,22%	0,48%	$4,8 \cdot 10^{-9}$
TiO ₂	2,405 [174]	124,8 nm	80,7%	1,231	97,14%	0,48%	$1,7 \cdot 10^{-5}$
ZnO	1,616 [175]	124,8 nm	73,5%	1,231	97,15%	0,48%	$7,7 \cdot 10^{-11}$

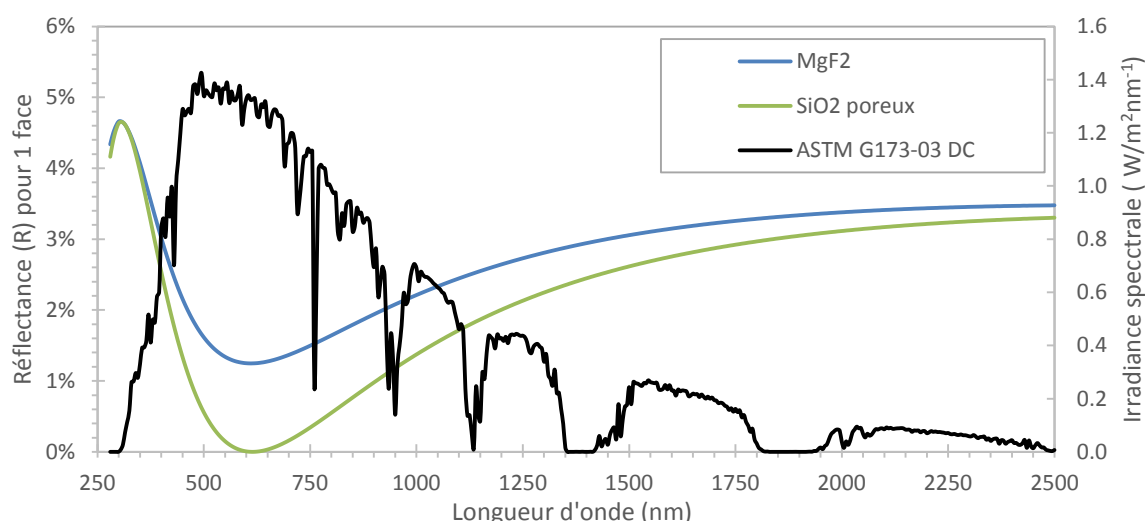


Figure 82 : Réflectance spectrale par face de monocouches antireflet optimisées MgF₂ dense et SiO₂ poreux (Table 19) sur verre BK7® de 1 mm d'épaisseur

Chacun des matériaux poreux étudiés permet d'atteindre des transmittances solaires deux faces élevées, supérieures à 97%. La transmittance solaire deux faces calculée pour des matériaux réels, T_{s-2} comprise entre 97,14% et 97,23% (Table 19, colonne 6), est très proche de la valeur limite calculée pour un antireflet théorique idéal, $T_{s-2} = 97,24\%$ (voir paragraphe précédent). A titre de comparaison, une monocouche MgF₂ dense donne une transmittance solaire deux faces de 95,44%. Les monocouches diélectriques oxydes et fluorures poreuses sont donc d'excellentes solutions antireflets pour le verre. Il suffit d'adapter leur porosité pour s'approcher d'un antireflet monocouche idéal.

Le choix préférentiel du SiO₂ poreux dans la bibliographie n'est pas dû à une meilleure performance de ce matériau, mais au fait qu'il est possible avec ce matériau d'atteindre un indice de réfraction bas tout en conservant une porosité modérée ($\approx 50\%$) comparativement aux autres matériaux (Table 19, colonne 4). Le MgF₂ et le CaF₂ poreux sont également d'excellents

candidats du point de vue de leurs performances pour une porosité équivalente à celle du SiO_2 poreux, mais les fluorures sont plus onéreux que ce dernier [176].

Notons que toutes les valeurs d'absorptances solaires « A_s verre + CAR » (Table 19, colonne 7) sont identiques et égales à 0,48%, ce qui correspond à l'absorptance solaire du verre. En effet, seul le verre est absorbant et cette absorption est intrinsèque à la composition du verre et à son épaisseur, qui dans notre cas ne varient pas (1 mm de verre BK7®). Les matériaux de la couche antireflet ont une absorptance solaire extrêmement faible, inférieure à 10^{-5} dans tous les cas (Table 19, colonne 8).

3.4. Conclusion sur les antireflets solaires monocouches

Malgré des caractéristiques prometteuses et une mise en œuvre relativement simple, nous venons de voir les limitations que peuvent présenter les monocouches antireflets comme solution pour augmenter la transmittance solaire. En particulier, il n'est pas possible de dépasser une valeur de transmittance solaire de 97,3% pour un verre BK7®, même avec une monocouche antireflet idéale. Des architectures multicouches peuvent améliorer les performances solaires. Nous allons étudier ces solutions, en commençant par des bicouches puis des multicouches de plus de deux couches.

IV. Antireflets solaires bicouches

4.1. Éléments de théorie pour les antireflets bicouches

La structure bicouche étudiée est présentée sur la Figure 83. Elle est constituée d'un substrat en verre d'indice de réfraction complexe $n_s + ik_s$, sur lequel sont empilées deux couches minces d'indices $n_1 + ik_1$ et $n_2 + ik_2$, et d'épaisseurs d_1 et d_2 , respectivement. Nous calculons pour cette structure les propriétés solaires par face, desquelles est directement déduite la transmittance solaire deux faces correspondant à l'architecture où le même bicouche antireflet optimisé est présent de chaque côté du verre (équation (V-1)).

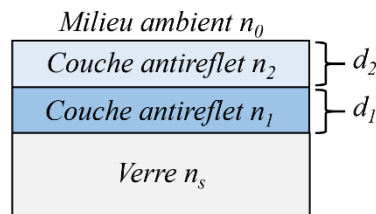


Figure 83 : Architecture d'une bicouche antireflet (une face)

La règle sur les indices de réfraction, issue des coefficients de Fresnel, permettant d'obtenir une réflexion nulle à une longueur d'onde donnée dans le cas d'un bicouche antireflet est elle aussi bien établie. L'équation (V-5) donne les indices de réfraction idéaux (n_1 et n_2) des couches minces du bicouche, en fonction des indices du substrat (n_s) et du milieu ambiant (n_0),

nécessaires à l'observation d'une réflexion très faible à une longueur d'onde donnée ($\rho(\lambda_0) \approx 0$), basée sur l'obtention d'interférences destructives par association de lames quart d'onde et demi-onde. L'équation simplifiée (V-5) suppose que tous les matériaux ont un coefficient d'extinction nul ($k = 0$) et que l'angle d'incidence du rayonnement est normal [72]. L'établissement de cette équation est détaillé en annexe (§5.1, p.295).

$$n_0 = \frac{n_2^2 \cdot n_s}{n_1^2} \xrightarrow{n_0=1} n_1^2 = n_2^2 \cdot n_s \quad (\text{V-5})$$

Pour observer une réflexion parfaitement nulle à une longueur d'onde précise, l'équation (V-5) doit satisfaire certaines conditions qui sont également détaillées dans les annexes (§5.1, p.295). Cette équation fait intervenir deux inconnues (n_1 et n_2), n_s et n_0 étant imposés. Les solutions peuvent être séparées en deux familles :

1. Les empilements à gradient d'indice de réfraction, tels que $n_s > n_1 > n_2 (> n_0)$.
2. Les empilements de couches minces dont l'un des indices de réfraction est plus élevé que celui du substrat, tels que $n_1 > n_s > n_2$ ou $n_2 > n_s > n_1$.

Le manque de matériaux d'indice de réfraction inférieur à celui du verre ($n_s = 1,51$) rend plus aisé l'utilisation de la deuxième famille de solutions. Par exemple, en considérant un ensemble de matériaux satisfaisant $n_1 > n_s > n_2$ et en choisissant $n_2 = 1,38$ (indice de réfraction du MgF_2 à 600 nm), nous obtenons $n_1 = 1,70$, soit un indice proche de celui de Al_2O_3 ($n = 1,68$ à 600 nm).

4.2. Transmittance solaire des antireflets bicouches

Pour avoir une bonne transmittance solaire, il n'est pas nécessaire ni même pertinent d'avoir une réflexion monochromatique nulle. Nous recherchons une réflectance solaire faible, correspondant à une densité de flux solaire (W/m^2) réfléchi par le substrat et la couche antireflet la plus faible possible sur l'ensemble du spectre solaire (de 280 à 2500 nm). Pour identifier les meilleures solutions antireflet bicouches parmi un large panel de possibilités, nous avons utilisé l'algorithme d'optimisation présenté dans le chapitre II.

Pour cela nous avons recherché pour un substrat d'indice de réfraction $n_s = 1,51$ constant la meilleure transmittance solaire obtenue avec deux couches minces parfaitement transparentes ($k = 0$) et d'indices de réfraction constants. Le programme génère des couples d'indices de réfraction n_1 et n_2 entre deux extrema ($n = 1$ et $n = 2$) et optimise l'épaisseur des deux couches minces d'indices n_1 et n_2 pour maximiser la transmittance solaire une face. Les résultats pour les couples d'indice étudiés sont illustrés par la Figure 84.

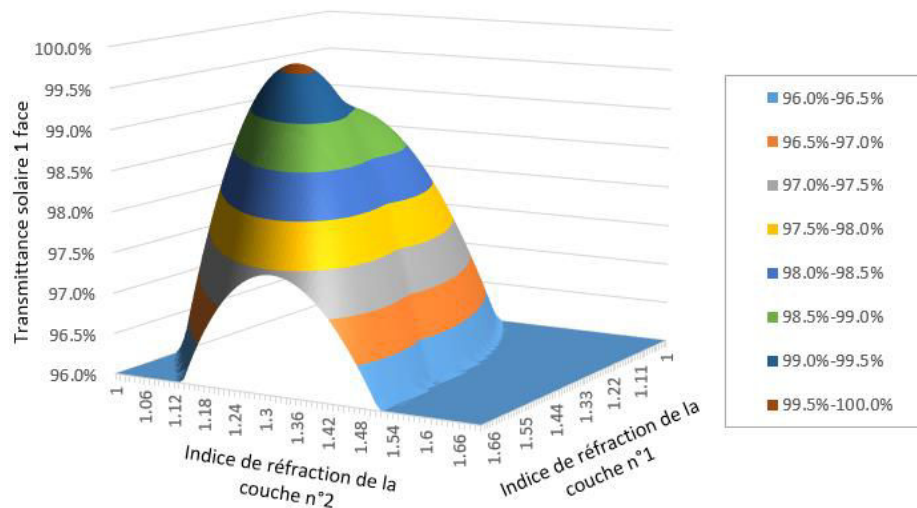


Figure 84 : Transmittance solaire une face en fonction des indices n_1 et n_2 d'un bicouche antireflet d'épaisseurs optimisées sur substrat d'indice $n_s = 1,51$

Plusieurs constats peuvent être faits :

- Un gradient d'indice de réfraction tel que $n_s > n_1 > n_2$ donne les meilleurs résultats ($T_s > 99\%$). C'est l'une des solutions de l'équation (V-5).
- Pour les autres solutions de l'équation (V-5) : les solutions telles que $n_1 > n_s > n_2$ mènent à une valeur de T_s plus faible, bien que supérieure à 97%, tandis que les solutions telles que $n_2 > n_s > n_1$ sont encore moins performantes ($T_s < 96\%$).
- Les solutions telles que $n_1 > n_2 > n_s$ ne donnent aucune solution minimisant la réflectance solaire. En effet, pour ces indices de réfraction, les épaisseurs optimales des couches minces d_1 et d_2 (non détaillées ici) sont nulles, indiquant qu'un substrat nu est préférable.

Une couche d'indice $n_2 \approx 1,13$ sur une couche d'indice $n_1 \approx 1,33$ sur un substrat d'indice $n_s = 1,51$ semble être le meilleur compromis pour maximiser la transmittance solaire une face, $T_s = 99,56\%$. Les épaisseurs optimisées des deux couches minces sont respectivement de $d_2 = 135$ nm et $d_1 = 115$ nm, ce qui place le minimum de réflexion de chaque couche mince à une longueur d'onde λ_0 proche de 610 nm (équation (V-4)). Cette position du minimum de réflexion est identique à celle trouvée dans le cas d'un antireflet monocouche, car elle ne dépend que du spectre solaire considéré (ici ASTM G173-03 DC). En complément, nous avons réalisé d'autres simulations avec des indices de réfraction du substrat allant de 1,3 à 2. Les tendances concernant les indices de réfraction maximisant la transmittance solaire sont similaires à celles présentées ici.

4.3. Matériaux pour les antireflets bicouches

A l'issue de l'analyse précédente, il ne semble donc pas possible d'obtenir des transmittances solaires supérieures à celles données par une monocouche antireflet en utilisant des matériaux en couches minces d'indices de réfraction (n_1 et n_2) supérieurs à celui du substrat (n_s). Or il est difficile de trouver des matériaux présentant des indices de réfraction faibles, typiquement inférieurs à 1,5 qui est l'indice d'un verre classique.

Comme précédemment, on peut utiliser des matériaux denses d'indices faibles, le choix se limitant aux fluorures. Par exemple, un empilement BK7® / CaF₂ ($n_1 = 1,43$, $d_1 = 50$ nm) / MgF₂ ($n_2 = 1,38$, $d_2 = 90$ nm) assure une transmittance solaire deux faces de 95,5%. Dans tous les cas, avec deux matériaux denses, la transmittance solaire deux faces reste inférieure à celle obtenue avec une monocouche antireflet de SiO₂ poreux, $T_{s-2} = 97,23\%$. Pour augmenter T_{s-2} , il est donc nécessaire d'avoir recours à deux couches poreuses.

Bicouches antireflets à base de SiO₂ poreux

Nous avons cherché grâce à notre algorithme d'optimisation à maximiser la transmittance solaire par face pour un verre BK7® de 1 mm d'épaisseur sur lequel sont déposées deux couches de SiO₂ poreuses, en optimisant leurs porosités et épaisseurs respectives (Figure 85).

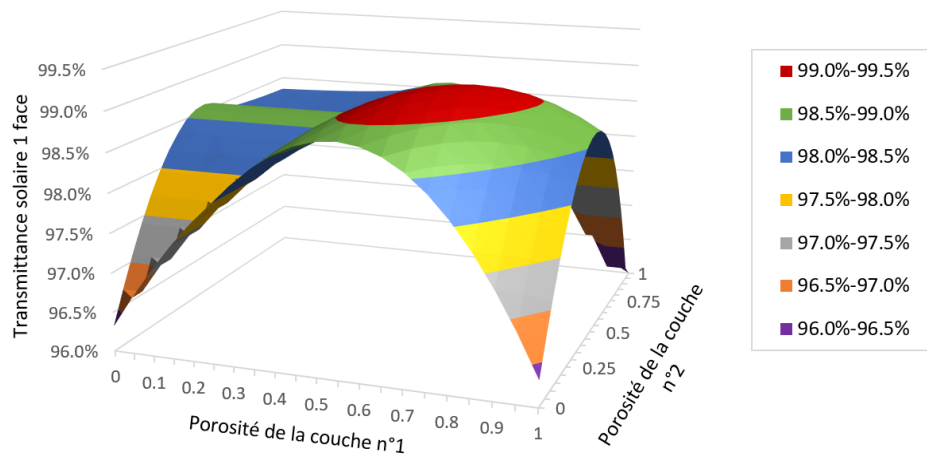


Figure 85 : Transmittance solaire une face d'un bicouche de SiO₂ poreux déposé sur 1 mm de verre BK7®

La meilleure transmittance solaire une face (99,27%) est obtenue avec une couche inférieure (la plus proche du substrat) de porosité 29% et d'épaisseur $d_1 = 113$ nm, et une couche supérieure de porosité 70% et d'épaisseur $d_2 = 133$ nm. Dans ce cas optimisé, on atteint une transmittance solaire deux faces de 98,82%, soit un gain de 1,59% par rapport à une monocouche antireflet SiO₂ poreuse (97,23%) (Table 19, p.164). Dans tous les cas, les porosités menant aux transmittances solaires une face les plus élevées ($T_s > 99\%$, aire rouge de la Figure 85) sont de l'ordre de 15-35% pour la couche n°1 et 60-80% pour la couche n°2. Ces valeurs sont conformes aux solutions préconisées dans le paragraphe précédent (§4.1), les niveaux de porosité servant simplement à ajuster les indices de réfraction des matériaux poreux proche des valeurs idéales ($n_1 \approx 1,33$ et $n_2 \approx 1,13$) pour minimiser la réflexion.

Pour obtenir une transmittance solaire optimale, la réflectance spectrale du bicouche doit présenter deux minima de réflexion à $\lambda_0 = 470$ et 830 nm (Figure 86, courbe verte en « W ») au lieu d'un seul à $\lambda_0 = 610$ nm pour le monocouche (Figure 86, courbe bleue). Ce profil en W est une solution classique de l'équation (V-5) (voir annexe §5.1, p.295). Il provient du fait que chacune des couches minces prises séparément respecte la condition d'idéalité pour une monocouche donnant un minimum de réflexion à $\lambda_0 = 610$ nm (équation (V-4)). La valeur de 610 nm dépend seulement du spectre solaire considéré (ASTM G173-03 DC).

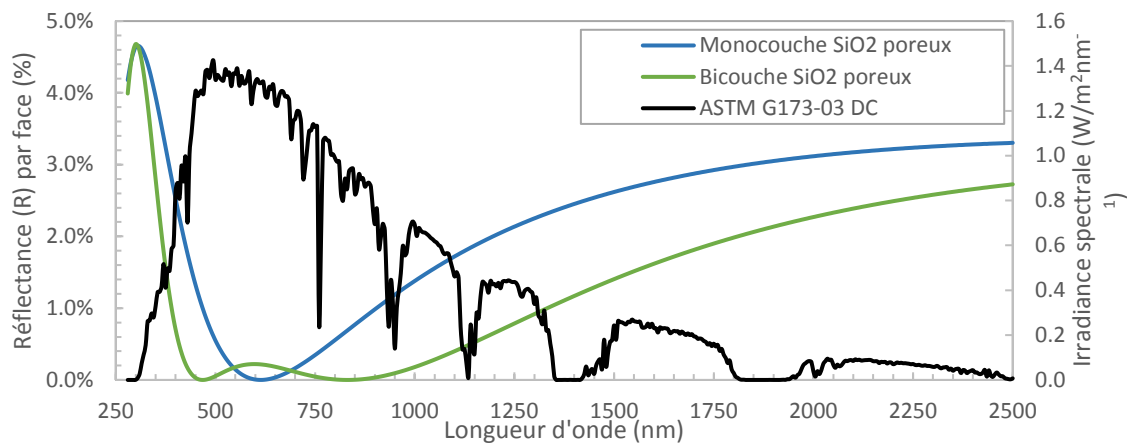


Figure 86 : Réflectances spectrales d'une monocouche et d'un bicouche de SiO_2 poreux optimisés pour maximiser la transmittance solaire de 1 mm de verre BK7[®]

Dans le cas du bicouche SiO_2 poreux (courbe verte), le domaine spectral de faible réflectance est ainsi plus étendu que dans le cas monocouche (courbe bleue), donnant ainsi lieu à une transmittance solaire plus élevée.

4.4. Conclusion sur les antireflets solaires bicouches

L'emploi de plusieurs couches poreuses permet de dépasser la limite théorique idéale de 97,72% de transmittance solaire deux faces observée pour des solutions monocouches (§3.1, p.158). Le passage d'un antireflet SiO_2 poreux monocouche à bicouche permet d'améliorer la transmittance solaire deux faces de 1,59%, soit de 97,23% à 98,82%, gain non négligeable. Les porosités nécessaires sont alors respectivement de 29% et 70% pour les deux couches de SiO_2 poreux du bicouche. Ces valeurs sont atteignables expérimentalement, compte tenu de l'existence de solutions monocouches de SiO_2 poreux (porosité $\approx 50\%$) à usage antireflet ainsi que d'aérogels (porosité $\approx 99\%$) dans d'autres domaines d'application.

V. Antireflets solaires multicouches

Après avoir étudié les antireflets solaires constitués d'une ou deux couches minces, nous étudions maintenant les antireflets solaires multicouches, c'est-à-dire de plus deux couches minces, afin de voir s'il est possible d'améliorer encore les performances solaires.

5.1. Antireflets multicouches constitués de matériaux poreux

A la lumière des paragraphes précédents, nous pouvons tenter d'augmenter encore la transmittance solaire en superposant plus de deux couches minces poreuses de SiO_2 et en optimisant leurs porosités et leurs épaisseurs respectives. La Figure 87 illustre les valeurs des transmittances solaires deux faces (T_{s-2}) obtenues pour des antireflets optimisés allant de une à cinq couches de SiO_2 poreux superposées sur 1 mm de verre BK7[®]. Les cas monocouche et bicouche sont issus des paragraphes 3.3 et 4.2, respectivement.

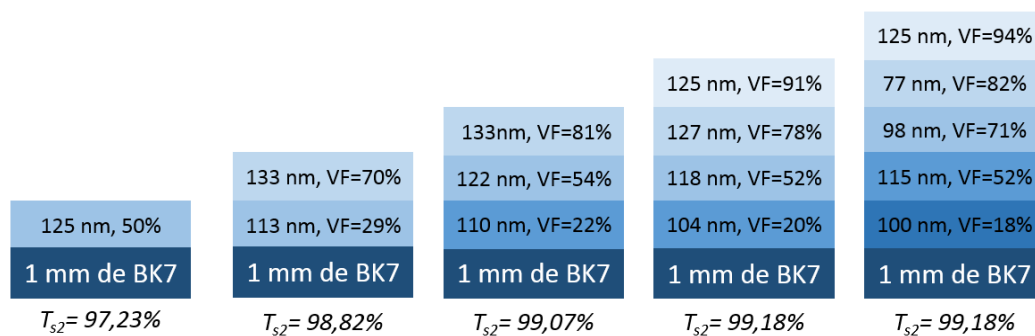


Figure 87 : Architecture et transmittance solaire deux faces (T_{s-2}) des couches antireflets à base de SiO_2 poreux sur 1 mm de $\text{BK7}^{\text{®}}$ d'épaisseurs et porosités (VF) optimisées

Comme précédemment, les couches antireflets constituées de matériaux poreux donnent de très bons résultats de transmittance solaire, car elles respectent un gradient d'indice de réfraction entre l'air ($n_0 = 1$) et le substrat en verre ($n_s = 1,51$ pour le verre $\text{BK7}^{\text{®}}$). Notons que l'augmentation du nombre de couches s'accompagne d'une augmentation de la porosité pour les couches supérieures, afin de satisfaire la diminution graduelle des indices optiques depuis le support verre jusqu'à l'air ambiant. Or un niveau de porosité élevé n'est pas souhaitable pour des raisons de stabilité et de faisabilité expérimentale de l'empilement. Il semble donc raisonnable de limiter le nombre de couches.

Pour une couche antireflet composée de trois couches de SiO_2 poreux, la transmittance solaire deux faces calculée est de 99,07%, ce qui correspond à un gain de 0,25% par rapport à la solution bicouche ($T_{s-2} = 98,82\%$). Une couche antireflet composée de quatre couches est légèrement plus performante, avec un gain supplémentaire de 0,11% ($T_{s-2} = 99,18\%$). Une couche antireflet cinq couches donne la même valeur de T_{s-2} . Il est donc inutile d'augmenter indéfiniment le nombre de couches car la transmittance solaire sature rapidement, après quatre couches dans cet exemple.

Comme précédemment il est possible d'utiliser d'autres matériaux que le SiO_2 pour créer les couches poreuses (MgF_2 , CaF_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO , etc.). Utiliser ces matériaux alternatifs dans des empilements multicouches mène aux mêmes transmittances solaires que celles montrées sur la Figure 87. En effet, quel que soit le matériau dense de départ, sa porosité est toujours optimisée afin que l'indice de réfraction du milieu poreux résultant diminue jusqu'à atteindre la même valeur cible optimale, qui dépend essentiellement de l'indice de réfraction du substrat et du nombre de couches de l'empilement antireflet (équation (V-5) par exemple). L'avantage du SiO_2 est qu'il présente sous sa forme dense un indice de réfraction déjà faible ($n = 1,47$ à 600 nm) comparativement aux autres matériaux, ce qui limite le taux de porosité nécessaire à des valeurs réalistes expérimentalement (pour leur élaboration).

Une autre solution techniquement intéressante serait d'utiliser une couche mince de MgF_2 dense entre le verre et deux couches poreuses pour créer par exemple un empilement tricouche verre/ MgF_2 / SiO_2 poreux/ SiO_2 poreux. En effet, l'indice de réfraction du SiO_2 poreux à 22% (couche inférieure du tricouche de la Figure 87) est de 1,37 ; valeur proche de 1,38 qui est l'indice du MgF_2 . Après optimisation de cet empilement sur verre $\text{BK7}^{\text{®}}$, la transmittance solaire deux faces obtenue est bien de 99,07% comme avec trois couches poreuses SiO_2 . Les épaisseurs optimales sont alors 103 nm / 112 nm / 127 nm.

5.2. Antireflets multicouches constitués de matériaux denses

Nous avons démontré dans les paragraphes précédents qu'il n'est pas possible d'atteindre des performances solaires élevées avec des matériaux denses en utilisant une ou deux couches minces. Les antireflets multicouches constitués de matériaux denses d'indices de réfraction supérieurs à celui du verre (Al_2O_3 , TiO_2 , ZnO , ZrO_2) [164] sont cependant utilisés dans de nombreux domaines (lunetterie [152], bâtiment [153], écrans [154], lasers [155], stockage de données [156]) où la transmission n'est optimisée que sur une gamme spectrale restreinte. Nous allons donc étudier ici des antireflets constitués de trois à cinq couches minces de matériaux denses, afin de tenter d'identifier des solutions antireflets permettant d'atteindre des transmittances solaires élevées à partir de ce type de matériaux.

En première approche, nous allons pour simplifier considérer des matériaux théoriques (n constant, $k = 0$) et optimiser les indices de réfraction et les épaisseurs des diverses couches minces afin de minimiser la réflectance solaire par face (qui permet de maximiser la transmittance solaire deux faces). Nous imposons une contrainte sur les indices, qui ne peuvent être inférieurs à 1,38, indice du MgF_2 à 600 nm, car c'est l'indice le plus bas connu pour un matériau dense. La

Table 20 décrit les meilleurs résultats calculés pour des antireflets de trois à cinq couches empilées sur un substrat de verre d'indice fixe $n_s = 1,51$. La numérotation des couches est croissante, du substrat vers le milieu ambiant.

Table 20 : Réflectance solaire de CAR multicouches d'indices de réfraction et d'épaisseurs optimisées pour un substrat d'indice $n_s = 1,51$

Nombre de couches	couche n°1	couche n°2	couche n°3	couche n°4	couche n°5	Réflectance solaire par face
3 couches	$n_1 = 1,469$ $d_1 = 56 \text{ nm}$	$n_2 = 1,698$ $d_2 = 14 \text{ nm}$	$n_3 = 1,380$ $d_3 = 127 \text{ nm}$	-	-	2,09%
3 couches	$n_1 = 1,572$ $d_1 = 184 \text{ nm}$	$n_2 = 1,624$ $d_2 = 17 \text{ nm}$	$n_3 = 1,382$ $d_3 = 115 \text{ nm}$	-	-	2,10%
4 couches	$n_1 = 1,777$ $d_1 = 6 \text{ nm}$	$n_2 = 1,612$ $d_2 = 195 \text{ nm}$	$n_3 = 1,542$ $d_3 = 89 \text{ nm}$	$n_4 = 1,382$ $d_4 = 111 \text{ nm}$	-	2,09%
4 couches	$n_1 = 1,607$ $d_1 = 164 \text{ nm}$	$n_2 = 1,458$ $d_2 = 16 \text{ nm}$	$n_3 = 1,548$ $d_3 = 54 \text{ nm}$	$n_4 = 1,384$ $d_4 = 112 \text{ nm}$	-	2,13%
5 couches	$n_1 = 1,571$ $d_1 = 9 \text{ nm}$	$n_2 = 1,568$ $d_2 = 62 \text{ nm}$	$n_3 = 2,397$ $d_3 = 129 \text{ nm}$	$n_4 = 1,543$ $d_4 = 87 \text{ nm}$	$n_5 = 1,384$ $d_5 = 111 \text{ nm}$	2,11%

Quel que soit l'empilement et le nombre de couches, la réflectance solaire par face est relativement élevée ($R_s > 2\%$). Cela limite la transmittance solaire pour deux faces à 95,4% (en tenant compte de l'absorptance solaire de 0,48% d'un 1 mm de verre BK7®), ce qui n'est pas très prometteur. Notons également que la dernière couche mince de l'empilement est systématiquement d'indice de réfraction très faible, proche de la limite fixée à 1,38.

Dans un second temps, nous allons tout de même nous baser sur les indices optiques de matériaux réels et voir s'il est possible d'atteindre de meilleures performances. Dans la pratique, il est difficile de trouver des matériaux réels d'indices adéquats tels que préconisés par la

modélisation. En revanche, on peut envisager d'utiliser des mélanges de matériaux pour ajuster à souhait les indices optiques [177]. Par exemple, un composite $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ permet d'atteindre des indices de réfraction compris entre 1,5 et 2,4 en fonction de la part de chaque constituant. Cette solution est déjà utilisée pour des couches antireflets destinées au photovoltaïque ou au bâtiment [164], [177], [178]. Une autre solution consisterait à utiliser des matériaux, tels que les films $\text{SiN}_x\text{:H}$ [179] ou SiNOCH [180], dont les méthodes d'élaboration permettent de faire varier les indices de réfraction (respectivement de 1,46 à 1,9 et de 1,7 à 2,1 selon la composition du matériau).

Pour illustration, nous avons tenté de satisfaire les critères d'indices préconisés pour la solution théorique à trois couches minces la plus performante ($R_s = 2,09\%$), à partir de composites de matériaux réels. Les couches sont ainsi constituées de mélanges contenant SiO_2 , MgF_2 et/ou Al_2O_3 pour obtenir à façon les indices de réfraction désirés. Les composites sont modélisés par EMA (voir chapitre I, §5.4 p.58) en utilisant cette fois les indices réels des matériaux (variant avec la longueur d'onde). La Table 21 donne l'architecture d'une solution tricouche obtenue à l'aide de l'algorithme d'optimisation. Les compositions (fractions volumiques des constituants) et les épaisseurs des couches sont optimisées pour minimiser la réflectance solaire par face.

Table 21 : CAR tricouche uniquement constituée de matériaux denses (composites)

	Matériau 1	Fraction volumique (%)	Matériau 2	Fraction volumique (%)	n (600 nm)	Épaisseur
Couche n°3	MgF_2	100%	-	-	1,377	123,3 nm
Couche n°2	SiO_2	31%	Al_2O_3	69%	1,594	32,0 nm
Couche n°1	MgF_2	78%	SiO_2	22%	1,398	20,7 nm
Substrat	$\text{BK7}^{\text{®}}$	100%	-	-	1,516	1 mm

L'empilement obtenu est principalement constitué d'une couche de MgF_2 (couche n°3, au sommet de l'empilement) d'une épaisseur plus grande que les deux autres. En raison de leurs faibles épaisseurs, les couches n°1 et n°2 n'ont qu'un rôle optique limité. Afin d'obtenir l'indice de réfraction nécessaire, tel que modélisé dans la

Table 20, ces dernières sont constituées d'un mélange entre deux matériaux, ici $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ et $\text{MgF}_2\text{-SiO}_2$. La Figure 88 illustre la réflectance de la solution tricouche obtenue. Bien qu'inférieure à celle d'un verre nu (courbe grise), elle n'est nulle pour aucune longueur d'onde.

Nous obtenons une réflectance solaire par face de 2,01%. La transmittance solaire deux faces correspondante est égale à 95,54%, en tenant compte des 0,48% d'absorptance solaire due au verre $\text{BK7}^{\text{®}}$ d'épaisseur 1 mm. Les empilements multicouches basés sur des mélanges de matériaux denses (SiO_2 , MgF_2 et Al_2O_3) ne permettent donc pas d'augmenter les performances solaires. La transmittance solaire deux faces obtenue est même notablement inférieure à celle d'une monocouche antireflet de SiO_2 poreux (97,23%). A titre de comparaison, la transmittance solaire deux faces (T_{s2}) du MgF_2 seul est de 95,71 %. Cette solution est donc moins performante, malgré l'emploi de plusieurs couches minces dont l'indice de réfraction peut être ajusté à façon, en jouant sur la part de leurs constituants (couches n°1 et n°2). Nous concluons

donc que l'emploi de multicouches antireflet de matériaux denses en énergie solaire n'offre pas d'avantage par rapport à une solution monocouche seule.

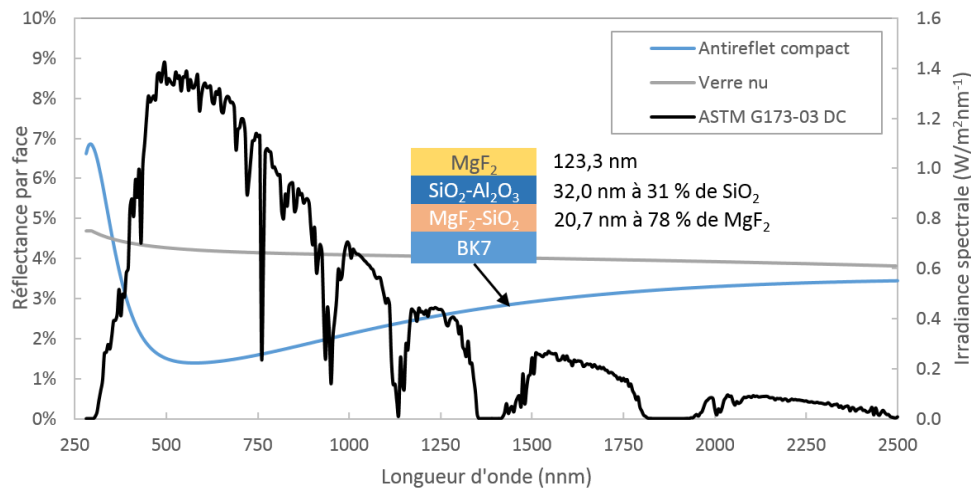


Figure 88 : Réflectance d'un CAR tricouche uniquement constitué de matériaux denses

5.3. Conclusion sur les antireflets multicouches

Les antireflets solaires multicouches permettent d'obtenir de hauts degrés de performances, à condition que les couches utilisées soient des couches poreuses. Les multicouches denses à usage solaire sont moins performantes que les solutions monocouches et sont donc à écarter. Si la solution à trois couches minces poreuses ou plus permet théoriquement d'obtenir plus de 99% de transmittance solaire, ces solutions sont cependant difficiles à mettre en place. En effet, il est nécessaire d'atteindre des niveaux de porosité relativement élevés, de l'ordre de 81 à 94%, qui peuvent s'avérer difficiles à réaliser expérimentalement et ne favorisent pas la tenue mécanique des revêtements. De plus, la complexité accrue de réalisation de ces empilements n'est pas compensée par le gain de performance. Celui-ci est en effet modéré par rapport aux solutions bicouches, puisque l'ajout de couches minces poreuses au-delà de la seconde n'améliore au maximum que de 0,36% la transmittance solaire deux faces (1 mm de verre BK7®). Au final, les solutions multicouches ne sont donc pas à privilégier pour les applications solaires, par rapport aux solutions bicouches, voire monocouches dans le cas de matériaux denses.

VI. Effets additionnels : vers les vitres antireflet et collecteurs solaires réels

Malgré la possibilité d'améliorer légèrement la transmittance des verres de protection utilisés dans de nombreux dispositifs solaires, des aspects supplémentaires sont néanmoins à prendre en compte. En particulier, dans le cas de couches antireflet poreuses, il peut être judicieux d'utiliser des couches additionnelles de protection contre leur détérioration ou leur encrassement. L'effet de l'angle d'incidence du flux solaire sur les surfaces traversées, leur

rugosité ou encore l'effet de variabilité des épaisseurs des couches déposées dans les architectures multicouches doivent également être considérés. Enfin, le choix du substrat lui-même peut avoir une influence non négligeable sur les performances solaires.

6.1. Effet de l'ajout d'une couche de protection pour la couche poreuse

Il est montré dans la bibliographie que les couches de SiO_2 poreux sont sujettes au vieillissement, en particulier dû à la contamination par la vapeur d'eau [161], [181]. Le mélange poreux air- SiO_2 tend alors vers un mélange H_2O - SiO_2 . L'indice de réfraction de l'eau ($n = 1,32$) étant plus élevé que celui de l'air ($n = 1$), l'indice du mélange H_2O - SiO_2 est plus élevé que celui du mélange air- SiO_2 et donc l'efficacité de la couche antireflet décroît fortement. L'une des solutions actuelles consiste à retirer les groupements actifs hydroxyle ($-\text{OH}$) de la surface provenant des groupes résiduels silanol ($\text{Si}-\text{OH}$) pour les remplacer par des groupements organosil ($\text{Si}-(\text{CH}_3)_3$) bloquants, comme illustré sur la Figure 89. Ce traitement de surface additionnel s'effectue par immersion dans un bain d'hexaméthylidisilane (HMDS).

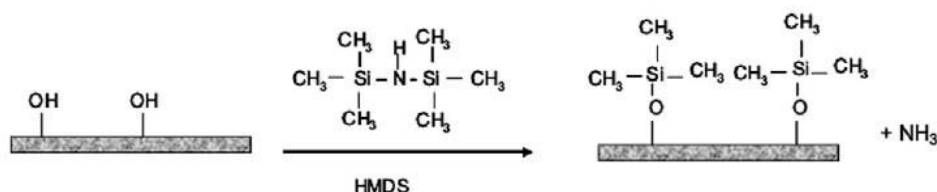


Figure 89 : Modification de la surface d'une couche de SiO_2 poreux par remplacement des groupements hydroxyyles [161]

Nous proposons ici une solution originale pour la protection des couches de SiO_2 poreux, consistant à revêtir une couche antireflet SiO_2 poreux d'une fine couche de protection (CP) de SiO_2 dense (Figure 90) afin d'empêcher la vapeur d'eau de contaminer la couche poreuse. Une utilisation similaire est rencontrée en chimie, où des nanoparticules métalliques (or ou cobalt) sont recouvertes de SiO_2 [182], [183] pour les rendre biocompatibles ou hydrophiliques. Pour cela, des épaisseurs faibles de l'ordre de 15 nm peuvent suffire.

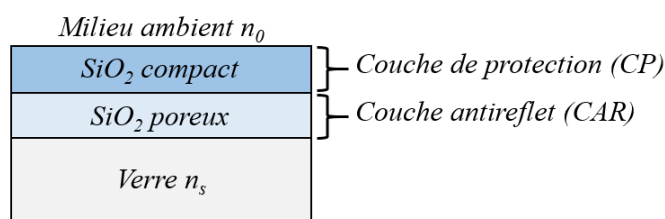


Figure 90 : Empilement de CAR SiO_2 poreux avec une couche de protection en SiO_2 dense sur un substrat de 1 mm de $\text{BK7}^{\text{®}}$

L'ajout de cette couche de protection a une répercussion sur les caractéristiques optiques de l'antireflet. Pour maximiser la transmittance solaire, il est donc nécessaire d'optimiser à nouveau la couche poreuse en tenant compte de la couche de protection additionnelle. Les résultats d'optimisation de la couche poreuse (épaisseur et porosité) sont présentés dans la Table 22 pour différentes épaisseurs de la couche SiO_2 de protection, de 0 à 35 nm. La valeur à maximiser est ici la transmittance solaire pour une face, car il n'est pas toujours nécessaire de

protéger les deux faces, par exemple dans le cas des tubes absorbeurs évacués où la face interne est sous vide.

Table 22 : Transmittance solaire une face d'une CAR SiO₂ poreux optimisée avec une couche de protection en SiO₂ dense

Epaisseur SiO₂ dense	Epaisseur SiO₂ poreux	Porosité SiO₂ poreux	Transmittance solaire 1 face
0 nm	125 nm	50 %	98,59 %
10 nm	100 nm	50 %	98,54 %
15 nm	88 nm	52 %	98,49 %
20 nm	75 nm	57 %	98,44 %
25 nm	64 nm	64 %	98,40 %
30 nm	52 nm	77 %	98,36 %
35 nm	41 nm	99 %	98,32 %

On observe que pour les épaisseurs étudiées, l'impact de la couche de protection est faible sur la transmittance solaire par face : on passe de 98,59% sans couche de protection à 98,32% avec une couche de protection de 35 nm. La couche superficielle de SiO₂ dense permettrait donc a priori de protéger la couche antireflet de SiO₂ poreux des conditions ambiantes sans pour autant pénaliser la forte transmittance solaire de l'ensemble. L'ajout de la couche de protection superficielle conduit à une diminution de l'épaisseur optimale de la couche antireflet poreuse, ainsi qu'à une augmentation de sa porosité optimale, qui devient élevée (>64%) au-delà de 25 nm d'épaisseur de SiO₂ dense, ce qui peut fragiliser mécaniquement l'empilement et rendre difficile la fabrication de la couche poreuse. Il semble ainsi raisonnable de limiter l'épaisseur de la couche de protection, par exemple à 15 nm, de sorte que la porosité optimale de SiO₂ poreux est de 52%, ce qui reste proche du cas sans couche de protection (50% de porosité). La transmittance solaire une face diminue de seulement 0,1% avec cette couche de protection de 15 nm, qui en contrepartie peut fortement améliorer la durée de vie de l'antireflet. Au final, pour une monocouche de SiO₂ poreux sur 1 mm de verre BK7® la transmittance solaire deux faces est de 97,03% avec la couche de protection de 15 nm, contre 97,23% sans la couche de protection.

6.2. Effets de la rugosité de surface et de l'incertitude d'épaisseur des couches déposées

Les méthodes utilisées pour prendre en compte dans la simulation la rugosité de surface ou entre couches et l'incertitude sur l'épaisseur de ces dernières sont détaillées dans le chapitre II (§3.3.2, p.83).

Influence de la rugosité

Nous avons étudié l'impact de la rugosité interfaciale sur la transmittance solaire d'une couche antireflet. La rugosité à l'interface entre deux couches ou entre la couche supérieure et l'air ambiant est modélisée comme une couche mince intermédiaire correspondant à un mélange de 50% du matériau de la couche inférieure et 50% du matériau de la couche supérieure (ou 50% d'air s'il s'agit de la rugosité de la couche superficielle). Les indices de réfraction de ces

couches intermédiaires additionnelles sont calculés par un modèle de milieu effectif (EMA, voir chapitre I, §5.4 p.58). L'empilement étudié ici est une monocouche antireflet de SiO₂ poreux optimisée (porosité 50%, épaisseur 124,8 nm) sur un substrat de 1 mm de BK7[®]. Dans ce cas, nous considérons deux types de rugosités (Figure 91), une rugosité dite de surface correspondant à une interface couche/air (n°1) et une rugosité dite de profondeur correspondant à une interface substrat/couche (n°2). L'empilement modélisé avec rugosité devient donc un multicouche substrat verre BK7[®] (1 mm) / rugosité 50% verre – 50% SiO₂ poreux / couche SiO₂ poreux (porosité 50%, 124,8 nm) / rugosité 50% SiO₂ poreux – 50% air / air. La rugosité n°1 correspond à une couche intermédiaire de SiO₂ poreux à 75%. Dans notre calcul, chacune des rugosités est variée entre 0 et 30 nm.

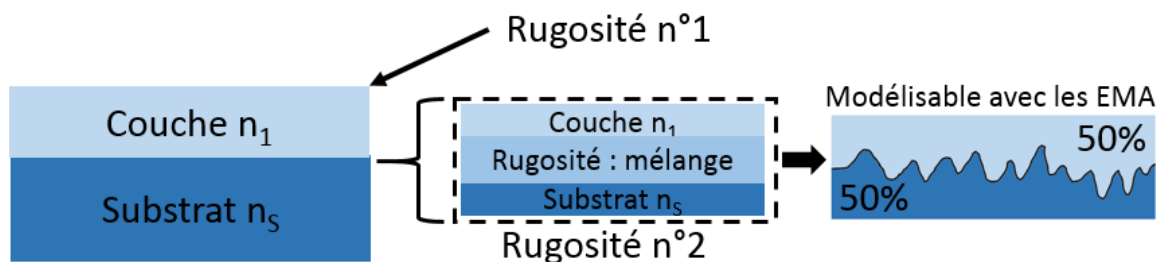


Figure 91 : Architecture d'un antireflet monocouche avec deux interfaces rugueuses

En théorie, ces rugosités peuvent avoir un effet positif sur la transmittance. En effet, la rugosité n°1 correspond à l'ajout d'une couche mince supplémentaire d'indice de réfraction faible, résultant du mélange entre l'air et la couche poreuse. De même, la rugosité n°2 crée artificiellement une couche d'indice de réfraction intermédiaire entre le substrat et la couche antireflet. Ces deux effets adoucissent ainsi le gradient d'indice de réfraction depuis l'air vers le substrat, minimisant la réflectance de l'ensemble.

La Figure 92 illustre la différence entre les réflectances solaires par face calculées sans rugosité et avec les deux rugosités ($\Delta R = R(\text{avec rugosités}) - R(\text{sans rugosité})$). Des rugosités faibles (< 10 nm) n'ont pas d'effet sur la réflectance ($\Delta R = 0$). Dans certains cas (rugosités autour de 15-20 nm), la combinaison des deux rugosités a bien un effet bénéfique en réduisant la réflectance ($\Delta R < 0$). Par contre, lorsque l'une ou l'autre des rugosités augmente au-delà de 25 nm (en particulier la rugosité de surface n°1), ou les deux, contrairement à ce qui est attendu, les deux rugosités combinées dégradent très légèrement la transmittance solaire (la réflectance augmente avec les rugosités, $\Delta R > 0$). Dans ces cas-là, l'addition des deux couches minces artificielles correspondant à la rugosité décale en fait la position du minimum de réflexion qui n'est plus à l'optimum de 610 nm, ce qui réduit au final la transmittance solaire. Ainsi, la rugosité de surface des couches, inhérente à leur méthode de fabrication, peut dans certaines conditions dégrader légèrement les performances solaires. Il peut donc être intéressant de mesurer ce niveau de rugosité, afin d'optimiser à nouveau l'épaisseur et la porosité de la couche antireflet poreuse et de compenser ainsi l'effet négatif de la rugosité.

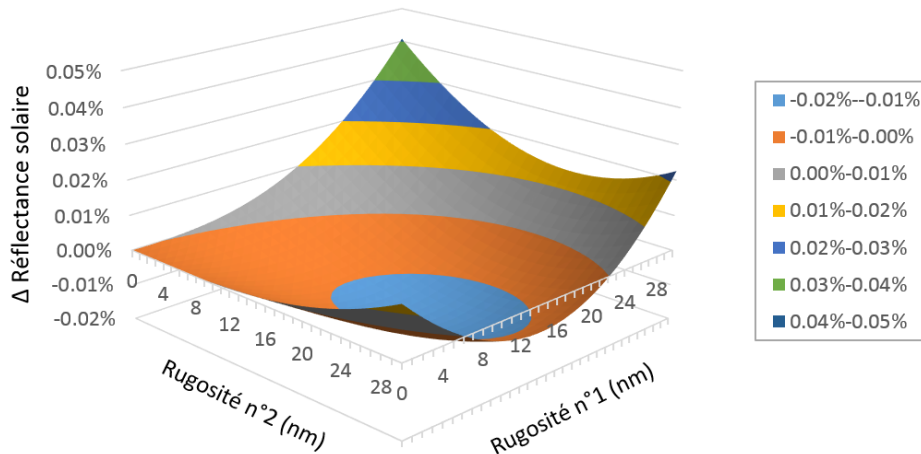


Figure 92 : Influence de la rugosité sur la réflectance solaire d'une CAR de SiO₂ poreux (125 nm, porosité 50%) sur 1 mm de verre BK7®

Tolérance sur l'épaisseur déposée

Nous nous sommes également intéressés à l'effet couplé sur les performances solaires des erreurs expérimentales sur l'épaisseur et la porosité d'une couche antireflet SiO₂ poreux pour 1 mm de verre BK7®, par rapport à une solution optimisée (porosité 50%, épaisseur 124,8 nm). Pour cela, nous avons utilisé la méthode présentée dans le chapitre II (§3.3.2, p.83). La Figure 93 présente l'effet sur la transmittance solaire une face de l'incertitude sur l'épaisseur (choisie ici de ± 0 nm à ± 30 nm autour de la valeur optimale de 124,8 nm) et la porosité (de $\pm 0\%$ à $\pm 16\%$ autour de la valeur optimale de 50%).

Un mauvais contrôle de l'épaisseur et de la porosité conduit dans tous les cas à une perte de transmittance solaire par face ($\Delta T < 0$). Cependant cette perte est relativement faible, au maximum -0,37% avec les incertitudes les plus élevées donc les moins réalistes (± 30 nm et $\pm 16\%$, en bas au centre de la courbe sur la Figure 93). Nous remarquons qu'il est préférable d'avoir un meilleur contrôle sur la porosité (donc sur l'indice de réfraction de la couche antireflet) que sur l'épaisseur (donc la position du minimum de réflexion λ_0). En effet, une épaisseur erronée conduit juste à déplacer le minimum de réflexion tandis qu'une erreur sur la porosité impose une réflexion plus importante sur tout le spectre solaire (voir Figure 76, p.159).

Dans le cas d'un antireflet bicouche poreux (non montré ici), une erreur couplée sur l'épaisseur et la porosité des deux couches de SiO₂ poreux réduit encore moins la transmittance solaire que dans le cas d'une monocouche. L'écart maximal avec l'optimum est pour le bicouche de -0,26% avec des erreurs de ± 30 nm sur l'épaisseur et $\pm 16\%$ sur la porosité des deux couches. Cette bonne tolérance s'explique par le large plateau autour de l'optimum obtenu pour une couche antireflet bicouche poreuse (Figure 85, p.168). De plus, les erreurs respectives sur la rugosité peuvent se compenser : en effet si une couche est plus dense, l'autre peut être plus poreuse. De même, une variation d'épaisseur peut compenser partiellement une variation de porosité. Cela permet au final de conserver la position du minimum de réflexion proche de l'optimum recherché (610 nm) et donc d'assurer une bonne transmittance solaire.

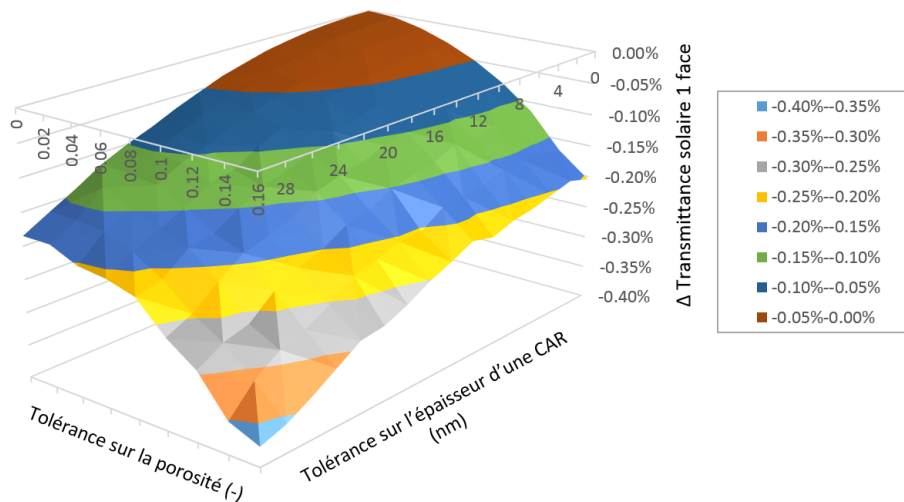


Figure 93 : Variation de transmittance solaire par face due aux incertitudes sur l'épaisseur et la porosité d'une couche antireflet SiO_2 (124,8 nm, porosité 50%) sur 1 mm de verre BK7®

Bilan

En conclusion, les effets de la rugosité et des incertitudes de dépôt tels que modélisés sont faibles et tendent à prouver que les antireflets poreux sont parfaitement réalisables expérimentalement. La rugosité entre les couches minces n'a que peu d'impact, puisqu'elle peut être soit légèrement bénéfique (+0,05% de transmittance solaire par face, soit + 0,1% de transmittance deux faces pour un verre complet), soit son influence est bénigne ($\Delta T_s \approx -0,02\%$ par face). A titre de comparaison une telle perte de transmittance est 25 fois inférieure à l'absorptance du verre support lui-même (0,48% pour 1 mm de BK7®). Des erreurs sur l'épaisseur ou sur la porosité peuvent être plus problématiques, mais la perte de transmittance associée reste tout à fait acceptable. Un meilleur contrôle de la porosité (donc de l'indice de réfraction) est alors préférable à un bon contrôle de l'épaisseur.

6.3. Effet de l'angle d'incidence du flux solaire

La position du soleil dans le ciel varie au cours de la journée, alors que de nombreux collecteurs solaires n'intègrent qu'un suivi solaire sur un seul axe, et que ce suivi n'est jamais parfait. De plus pour les tubes cylindriques des absorbeurs solaires sous vide, le rayonnement solaire n'arrive pas perpendiculairement sur l'intégralité de la surface de captation. Ainsi l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur les interfaces en verre peut varier fortement.

Nous avons donc étudié l'effet de l'angle d'incidence sur les performances solaires et sur l'optimisation d'une monocouche antireflet SiO_2 poreux déposée sur 1 mm de verre BK7®. La Figure 94 illustre la transmittance solaire deux faces à différents angles d'incidence (trait plein). Nous remarquons que jusqu'à un angle d'incidence de 40° , les pertes de transmittance par rapport à un angle d'incidence normal (97,22%) sont faibles (inférieures à 1%). Au-delà, la décroissance est rapide ($T_{s-2} = 91\%$ à 60°).

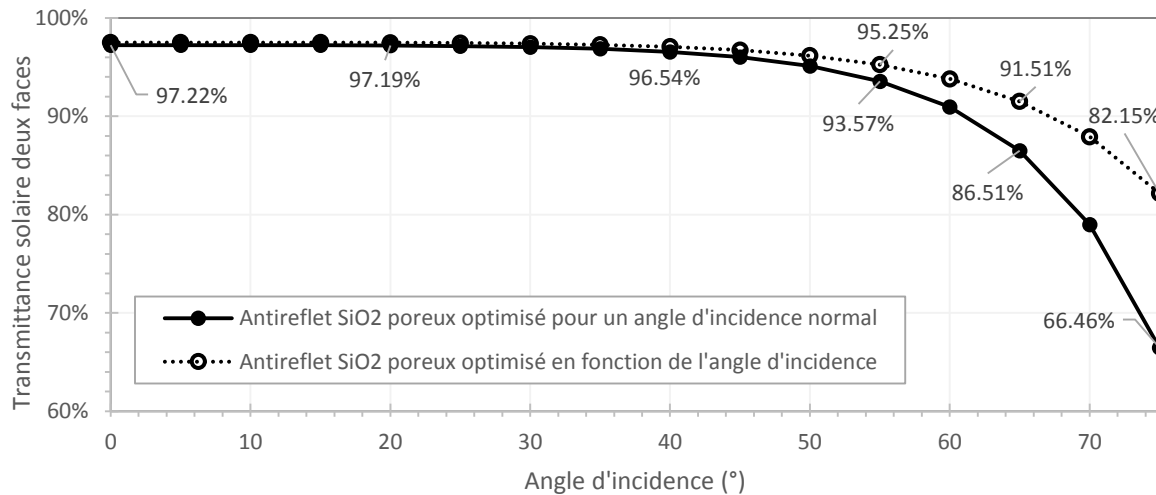


Figure 94 : Transmittance solaire deux faces en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement sur une monocouche de SiO_2 poreux sur verre BK7®

Dans un deuxième temps, nous avons donc tenté d'optimiser l'épaisseur et la porosité de la couche antireflet pour maximiser la transmittance solaire en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement. La Figure 95 illustre l'épaisseur et la porosité optimisées. La transmittance solaire correspondante est visible sur la Figure 94 (pointillés).

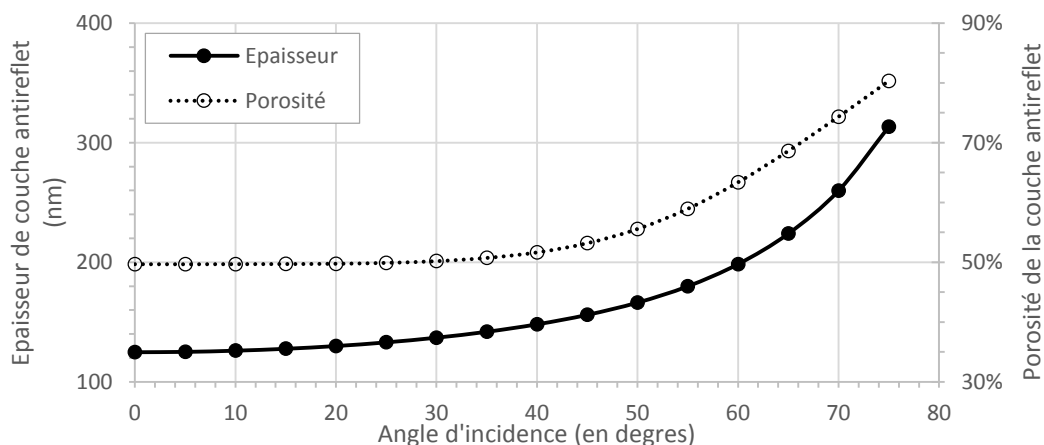


Figure 95 : Epaisseur et porosité optimisées en fonction de l'angle d'incidence du rayonnement pour une couche antireflet de SiO_2 déposée sur verre BK7®

Pour des angles d'incidence faibles (0° à 40°), l'épaisseur et la porosité varient peu, respectivement de 125 à 150 nm et de 50% à 51,5%. La transmittance solaire correspondante varie peu également. L'optimisation apporte peu de bénéfices dans ce cas (+ 0,5% à 40°). Pour des angles d'incidence supérieurs à 40° , la porosité et l'épaisseur optimales augmentent rapidement pour compenser la chute de transmittance. La couche antireflet optimale doit en effet avoir un indice de réfraction faible (porosité élevée) pour limiter le phénomène de réflexion totale (voir annexe §5.2, p.296). En conséquence, l'épaisseur de la couche augmente afin de garder le minimum de réflexion proche de 610 nm (équation (V-4)).

La Figure 96 illustre la réflectance spectrale par face de la couche optimisée, pour différents angles d'incidence allant de 15° à 60° .

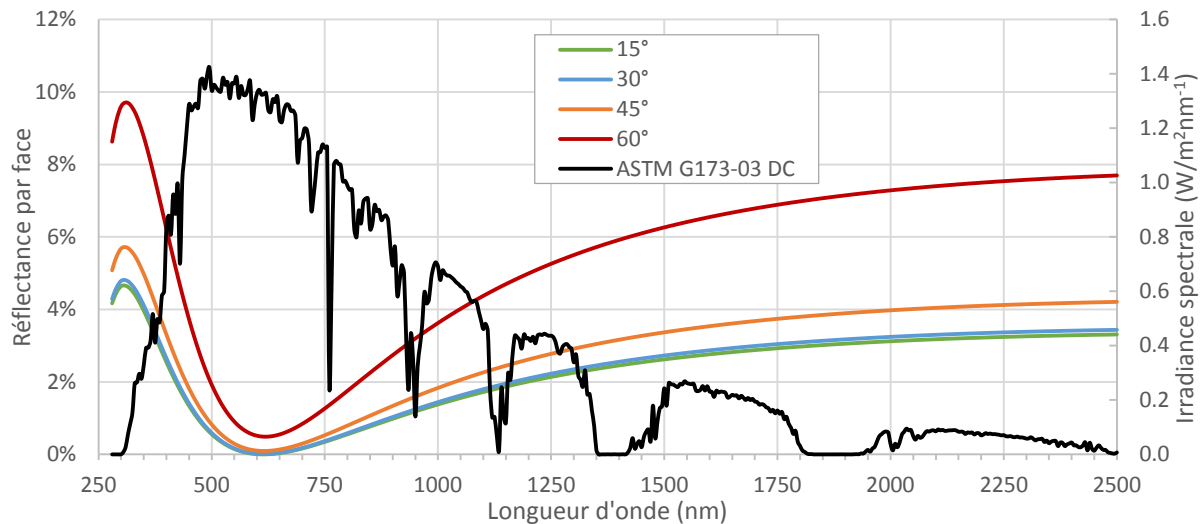


Figure 96 : Réflectance par face d'un antireflet SiO₂ poreux sur verre BK7[®] optimisé pour différents angles d'incidence

Dans tous les cas, l'optimisation place le minimum de réflexion à 610 nm en jouant sur l'épaisseur de la couche. La réflexion n'est par contre pas parfaitement nulle pour les angles élevés (60°). En effet, les conditions sur l'indice de la couche permettant d'obtenir une réflectance nulle (équation (V-3)) ne sont valables que pour une incidence normale.

Il est donc possible d'optimiser la couche antireflet selon l'angle d'incidence du rayonnement dans une application particulière, en faisant varier sa porosité et son épaisseur. Cependant dans un collecteur solaire, la surface transparente voit généralement le rayonnement à tous les angles d'incidence simultanément. Dans ce cas, il est bien judicieux d'optimiser la couche antireflet pour un angle d'incidence normal, car cette optimisation est valide pour des angles d'incidence jusqu'à 40°.

6.4. Impact de la qualité du verre utilisé comme substrat

Privilegié pour son faible coût, sa résistance mécanique, sa bonne transparence et son indice de réfraction bas, le verre BK7[®] est un substrat très utilisé. Mais de nombreux autres verres existent [184]. Nous avons donc recherché, pour 24 verres différents du catalogue Schott [138], la transmittance solaire obtenue avec une monocouche antireflet optimisée à base de SiO₂ poreux. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication dans la revue Solar Energy Materials and Solar Cells [185]. Nous en reprenons ici quelques points essentiels.

Le nombre d'Abbe V représente la variation de l'indice de réfraction du verre en fonction de la longueur d'onde. Il correspond aux indices de réfraction donnés pour trois longueurs d'onde : n_D (589,3 nm), n_F (486,1 nm) et n_C (656,3 nm). Son calcul s'effectue grâce à la l'équation (V-6).

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (\text{V-6})$$

Plus le nombre d'Abbe est élevé, plus le verre est dit achromatique, c'est-à-dire que son indice de réfraction varie peu en fonction de la longueur d'onde. Le nombre d'Abbe est une grandeur classique très utilisée dans l'industrie du verre car il est caractéristique de la composition chimique du verre. Un diagramme d'Abbe permet de replacer chaque type de verre, avec sa composition chimique, en fonction de son indice de réfraction n_d à $\lambda = 587,6$ nm et de son nombre d'Abbe V .

Nous avons calculé la transmittance solaire deux faces d'une grande variété de verres commerciaux recouverts d'une monocouche antireflet de SiO_2 poreux d'épaisseur et de porosité optimisées pour chaque verre. La Figure 97 présente les résultats de transmittance solaire deux faces obtenus sur un diagramme d'Abbe.

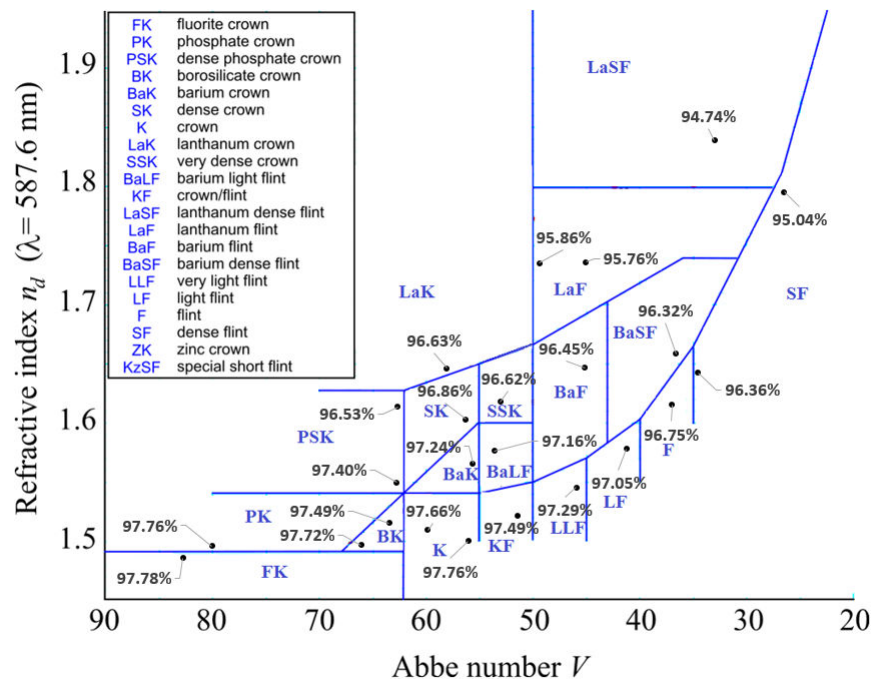


Figure 97 : Transmittance solaire deux faces en fonction du type de substrat pour une monocouche de SiO_2 poreux.

Hormis pour une exception (verre de type PSK), la transmittance solaire optimisée pour chaque type de verre est en lien avec les paramètres n_d et V .

1. **Indice de réfraction n_d .** C'est le paramètre ayant le plus d'impact. Plus l'indice de réfraction du verre est faible, plus sa transmittance solaire (avec antireflet optimisé) est élevée. En effet, un indice de réfraction faible pour le verre permet de limiter la réflectance aux longueurs d'onde qui sont éloignées du minimum de réflexion obtenu grâce à la couche antireflet (voir Figure 77, p.160).
2. **Nombre d'Abbe V .** Il est nécessaire que le verre conserve un indice de réfraction le plus constant possible avec la longueur d'onde (V élevé) afin que la couche antireflet optimisée puisse être efficace sur tout le spectre.

Ainsi, les verres alliant indice de réfraction faible et nombre d'Abbe élevé (Figure 97, en bas à gauche) sont les plus performants avec une monocouche antireflet de SiO_2 poreux optimisée. A contrario, les verres d'indices élevés ($n_d > 1,6$) couplés à des nombres d'Abbe faibles ($V < 50$) présentent les transmittances solaires les plus faibles (Figure 97, en haut à droite).

La Figure 97 permet de préconiser les verres les plus adéquats pour les applications solaires. Par exemple, l'usage de verres faiblement chromatiques de type PK et FK amène un gain de transmittance solaire deux faces compris entre 0,28% et 0,30% par rapport au verre BK7[®], souvent pris comme référence. Le verre BK10[®], dérivé du BK7[®], permet un gain similaire (+ 0,23%). En conclusion, pour augmenter la transmittance solaire, il faut non seulement travailler sur l'optimisation des couches antireflets, mais également choisir judicieusement le verre support.

6.5. Effet de la réflexion préalable dans les collecteurs solaires

Dans les collecteurs complets, le rayonnement solaire incident est très souvent réfléchi par un ou plusieurs miroirs avant d'atteindre les surfaces transparentes antireflet qui servent à protéger et isoler les composants comme l'absorbeur thermique. Le spectre solaire réfléchi par le miroir est différent du spectre solaire incident que ce dernier reçoit (voir chapitre IV). Il est donc souhaitable que les couches antireflet en aval des miroirs soient optimisées pour maximiser la transmittance solaire de ce spectre modifié. Or il est en théorie possible d'adapter les couches antireflets au spectre solaire qu'elles reçoivent. Par exemple, pour une monocouche antireflet, l'épaisseur de la couche permet de jouer sur la position du minimum de réflexion afin de maximiser la transmittance solaire (équation (V-4)).

A titre d'illustration, nous considérerons dans ce paragraphe le spectre solaire incident sur le verre avec antireflet comme le spectre solaire de référence (ASTM G173-03 DC) modifié au préalable par la réflexion sur différents miroirs étudiés dans le chapitre IV.

- Un miroir argent : $R_s = 95,5\%$.
- Deux miroirs argent (double réflexion) : $R_s = 90,8\%$.
- Un miroir aluminium $R_s = 92,2\%$.
- Un miroir argent recouvert de 4 bicouches $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$: $R_s = 97,6\%$.
- Un miroir diélectrique $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ sur verre : $R_s = 94,6\%$.
- Un miroir 3M[®] PV/CSP : $R_s = 56,3\%$.

Nous étudions la transmittance solaire deux faces d'un antireflet monocouche de SiO_2 poreux sur 1 mm de BK7[®]. L'épaisseur et la porosité de l'antireflet sont d'abord optimisées pour le spectre solaire de référence (Figure 98, barres bleues) puis pour le spectre solaire réfléchi par chaque miroir (Figure 98, barres rouges). Cela permet de quantifier le gain apporté par la prise en compte de la réflexion dans l'optimisation de l'antireflet.

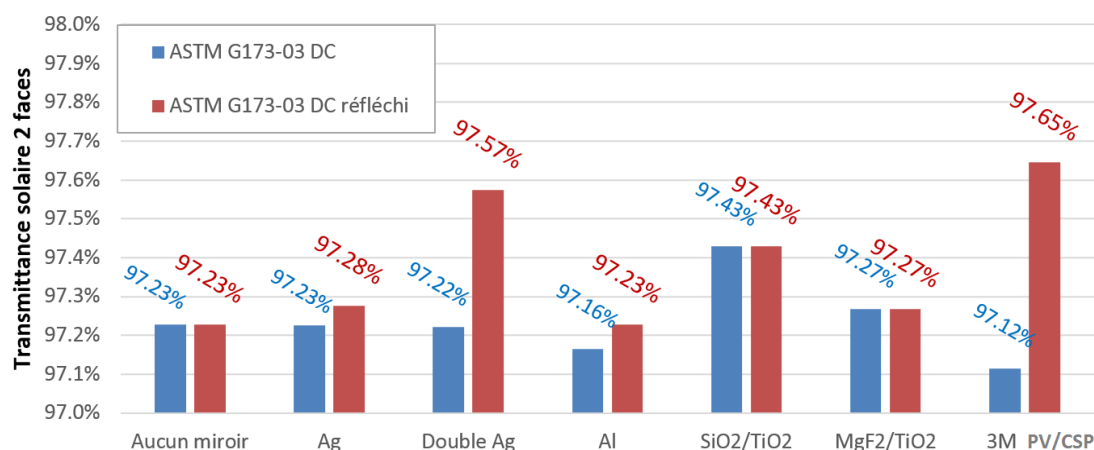


Figure 98 : Transmittance solaire deux faces d'un verre avec antireflet monocouche SiO₂ poreux en fonction du spectre solaire de référence (barres bleues) ou du spectre solaire réfléchi par différents miroirs (barres rouges)

Dans deux cas de figure, nous remarquons des gains importants de transmittance solaire, de l'ordre de 0,35 à 0,53%, lorsque la réflexion préalable du spectre solaire est prise en compte pour l'optimisation de la couche antireflet. Il s'agit des cas de double réflexion sur miroirs argent et de la réflexion sur un miroir 3M[®] PV/CSP. Ces deux miroirs modifient en effet beaucoup l'apparence du spectre solaire, avec notamment des réflectances très faibles à certaines longueurs d'onde. Par exemple, une double réflexion sur un miroir argent coupe presque entièrement les UV (voir chapitre IV, Figure 72 p.141). Ainsi, lors de l'optimisation, l'épaisseur de la couche antireflet (SiO₂ poreux à 50%) augmente afin de déplacer le minimum de réflexion (λ_0) vers l'IR pour maximiser la transmission de ce spectre solaire très modifié : l'épaisseur optimale est de 124,8 nm sans miroir ($\lambda_0 = 610$ nm), contre 128,7 nm avec un double miroir d'argent ($\lambda_0 = 630$ nm). A contrario, pour des miroirs très réflecteurs, comme les deux miroirs diélectriques SiO₂/TiO₂ sur verre et MgF₂/TiO₂ sur argent, le spectre solaire de référence est très peu modifié par la réflexion, de sorte que la position du minimum de réflexion reste identique à celle nécessaire pour le spectre solaire de référence (610 nm).

Ainsi, il est utile d'optimiser la couche antireflet pour le spectre réfléchi si les miroirs modifient significativement le spectre solaire incident. Dans le cas contraire, l'optimisation classique à partir du spectre solaire de référence est suffisante.

Après avoir pris en compte de nombreux effets pour se rapprocher de surfaces antireflets et collecteurs solaires réels (couche de protection, rugosité aux interfaces, incertitude sur l'épaisseur des couches, angle d'incidence du rayonnement, nature du verre support, réflexion préalable sur un miroir), nous allons pour finir nous intéresser comme précédemment à l'influence que peut avoir le site d'installation sur les performances des surfaces transparentes avec antireflet, à travers des spectres solaires locaux.

VII. Transmission de spectres solaires locaux

Les applications solaires dépendent des conditions météorologiques locales. Jusqu'ici nous avons calculé et optimisé des couches antireflets avec le spectre solaire de référence ASTM G173-03 AM1.5 DC. Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser aux performances solaires obtenues pour les verres avec couches antireflet soumises aux deux jeux de spectres solaires locaux dont nous disposons (voir chapitre III).

Transmittance solaire d'antireflets pour différents sites

Pour cette étude, nous avons sélectionné cinq antireflets sur 1 mm de verre BK7® parmi ceux présentés dans ce chapitre, optimisés pour maximiser la transmittance du spectre solaire de référence : une monocouche MgF_2 dense et une monocouche SiO_2 poreux (§3.3 p.162), un bicouche SiO_2 poreux (§4.3, p.167), une couche de SiO_2 poreux protégée par 15 nm de SiO_2 dense (§6.1, p.174) et un antireflet de trois couches de SiO_2 poreux (§5.1, p.169). Les transmittances solaires deux faces obtenues sont listées dans la Table 23 pour les différents sites considérés. Pour les sites où un spectre solaire annuel moyen a été calculé (chapitre III, §3.3 p.102), la transmittance solaire donnée est également annuelle. En effet, nous calculons autant de transmittances solaires que de spectres solaires par site, soit plusieurs milliers. Ces valeurs sont ensuite rapportées à l'irradiance de chaque spectre solaire par rapport à l'énergie totale reçue par an de chaque site, pour déterminer la transmittance solaire annuelle de chaque empilement (proportion d'énergie que la surface transmet sur une année).

Table 23 : Transmittance solaire deux faces d'antireflets en fonction des sites

Spectres solaires		MgF ₂ dense	SiO ₂ poreux	SiO ₂ poreux + SiO ₂ dense (protection)	Bicouche SiO ₂ poreux	3 couches SiO ₂ poreux
Référence	ASTM	95,71%	97,23%	97,03%	98,82%	99,07%
Moyens	Paranal	95,60%	97,10%	96,90%	98,75%	99,02%
	Ouarzazate	95,69%	97,22%	97,02%	98,82%	99,07%
	Montsec	95,71%	97,23%	97,03%	98,83%	99,08%
	Mezaira	95,69%	97,21%	97,01%	98,80%	99,05%
	Sandia	95,69%	97,21%	97,01%	98,81%	99,07%
Annuels moyens	Brisbane	95,72%	97,26%	97,06%	98,84%	99,09%
	Palaiseau	95,45%	97,23%	97,05%	98,82%	99,08%
	Ilorin	95,42%	97,20%	97,00%	98,75%	99,05%
	Nauru	95,54%	97,35%	97,16%	98,89%	99,16%
	Dakar	95,44%	97,23%	97,03%	98,79%	99,05%
	Xianghe	95,31%	97,04%	96,82%	98,75%	98,87%
	Sede Boqer	95,44%	97,22%	97,02%	98,81%	99,04%
	Solar Village	95,43%	97,20%	97,00%	98,80%	99,07%
	Izana	95,39%	97,14%	96,94%	98,77%	98,98%
	Moyenne ± écart-type	95,55% ±0,14%	97,20% ±0,07%	97,01% ±0,08%	98,80% ±0,04%	99,05% ±0,06%
Ecart max (max – min)		0,41%	0,31%	0,34%	0,14%	0,29%

Quel que soit le site considéré, l'ordre de performance des antireflets reste le même. Le traitement antireflet le plus performant correspond au tricouche de SiO_2 poreux qui présente une transmittance solaire deux faces supérieure à 99% (pertes par réflexion et absorption du verre inférieures à 1%). Cependant cette solution reste pour l'instant théorique et difficile à mettre en œuvre du fait de la porosité élevée (81%) de la dernière couche de l'empilement (Figure 87, p.170). Réduire le nombre de couches (bicouche puis monocouches) diminue progressivement les performances solaires de l'antireflet ($T_{s-2} \approx 98,8\%$ pour le bicouche, 97,2% pour le monocouche SiO_2), qui devient cependant plus facile à réaliser. Un antireflet SiO_2 poreux protégé par une couche SiO_2 dense est légèrement moins performant (-0,2%) qu'un antireflet SiO_2 poreux non protégé. L'antireflet monocouche dense MgF_2 est le moins performant dans tous les cas ($T_{s-2} \approx 95,5\%$).

Par contre, comme observé précédemment pour les miroirs (chapitre IV, §V, p.142), les écarts maximaux de transmittance solaire pour un même antireflet sont relativement faibles d'un site à l'autre, inférieurs à 0,4%. Sur les sites propices au CSP (Izana, Solar Village, Sede Boqer), les antireflets ont des performances intermédiaires. Il est intéressant de relever que le site de Nauru offre les meilleures performances solaires pour les antireflets, alors que c'est pour ce site que les miroirs solaires sont le moins efficaces (Table 17, p.145) car la part d'UV dans le spectre solaire est plus grande que sur les autres sites (Table 18, p.145) et que les miroirs ne reflètent pas efficacement les UV. A l'inverse, le site de Xianghe correspond aux transmittances solaires les plus faibles quels que soient les antireflets testés, aux performances de miroirs les plus élevées (sauf pour le miroir diélectrique $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ sur verre qui a les performances les plus faibles sur ce site), et au taux d'UV le plus faible.

Optimisation d'antireflets solaires pour les spectres locaux

Comme pour les miroirs, nous avons tenté d'optimiser les couches antireflets solaires pour des spectres solaires locaux. A titre de référence, nous avons tout d'abord étudié la transmittance solaire des différents spectres locaux par un verre BK7[®] de 1 mm recouvert d'une monocouche antireflet de SiO_2 poreux optimisée selon le spectre solaire de référence (ASTM G173-03 DC), c'est-à-dire d'épaisseur 124,8 nm et de porosité 50%. Il s'agit des barres bleues sur la Figure 99. Nous avons ensuite optimisé l'épaisseur et la porosité de cette même monocouche antireflet pour les différents spectres locaux moyens, présentés dans le chapitre III. Il s'agit des barres rouges sur la Figure 99. Les tendances observées ici sont identiques pour des antireflets monocouches utilisant d'autres matériaux (MgF_2 par exemple), pour des antireflets multicouches, et pour les autres spectres locaux.

Nous observons à nouveau que les écarts de performance pour les couches antireflets solaires sont très faibles entre les différents sites (maximum 0,15% entre Brisbane et Paranal). Nous remarquons également en comparant les barres bleues aux barres rouges qu'il n'est malheureusement pas possible d'optimiser la couche antireflet en fonction des spectres locaux. Nos optimisations ne mènent qu'à des gains de quelques millièmes à quelques centièmes de pourcent de transmittance seulement.

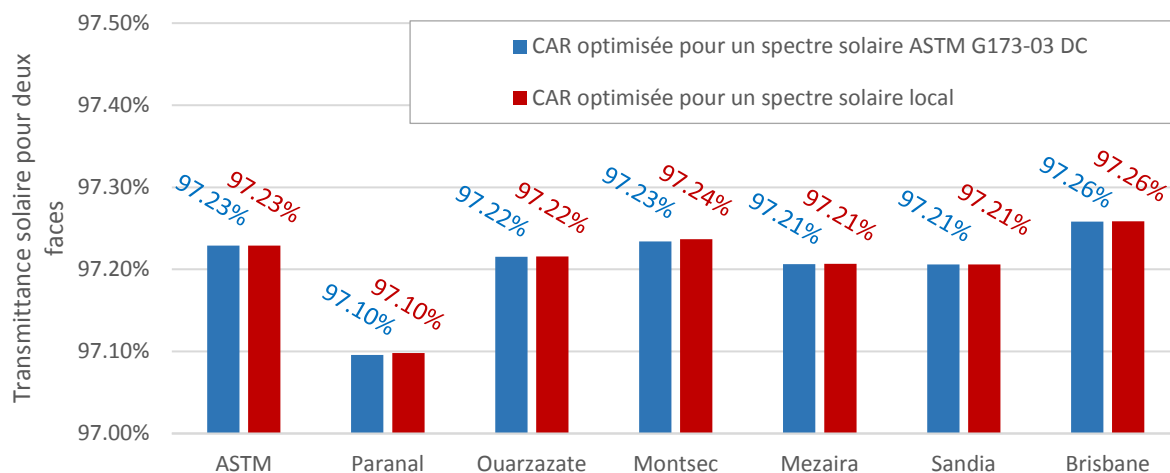


Figure 99 : Monocouche antireflet à base de SiO_2 poreux sur 1 mm de $\text{BK7}^{\text{®}}$ optimisée en fonction des spectres solaires de référence et locaux

Si de légers écarts de performances en transmission sont observés entre les différents sites, ceux-ci sont trop insignifiants pour justifier une adaptation des pratiques industrielles au site d'implantation, en ce qui concerne les antireflets solaires. Ainsi, il n'est pas nécessaire de tenir compte du spectre solaire local dans leurs optimisations. Un antireflet solaire optimisé pour le spectre solaire de référence sera efficace sur l'ensemble des sites favorables au CSP.

VIII. Conclusion du chapitre V

Les couches antireflets maximisant la transmission solaire dépassent le simple cadre de la filière du solaire thermique à concentration et sont par exemple également utilisées dans le bâtiment. La problématique y est de réduire la réflectance d'un verre nu sur un spectre solaire complet à l'aide de couches minces garantissant un effet antireflet (interférences destructives). La nature et l'indice de réfraction complexe du verre jouent un rôle essentiel dans cette problématique. L'absorptance solaire du verre est en effet également une source de pertes optiques, après la réflectance. Pour des épaisseurs de l'ordre du millimètre, le phénomène n'est pas négligeable ($A_s \approx 0,5\%$ pour 1 mm de verre $\text{BK7}^{\text{®}}$). Des verres d'indices de réfraction faibles (typiquement $n \approx 1,5$) et de nombres d'Abbe élevés (faible variation de l'indice avec la longueur d'onde) sont à privilégier pour minimiser cette absorptance.

Peu de solutions antireflets développées pour d'autres domaines d'application sont compatibles avec l'énergie solaire thermique, du fait de l'étendue en longueur d'onde du spectre solaire à transmettre. Cette dernière impose d'utiliser une couche antireflet présentant un gradient d'indice de réfraction réel entre le verre ($n \approx 1,5$) et le milieu ambiant ($n = 1$). Cela nous prive de la possibilité d'avoir recours à de nombreux matériaux denses et nous redirige vers des matériaux composites poreux. Ces milieux sont en effet les seuls qui permettent de limiter la réflectance du verre sur un spectre solaire complet. Nous avons identifié que la transmittance solaire est maximale si le minimum de réflexion garanti par la couche antireflet

est proche de 610 nm pour un spectre solaire direct (ASTM G173-03 DC). La nature du matériau antireflet influe peu tant que sa porosité (donc l'indice de réfraction de la couche poreuse résultante) est optimisée pour le verre choisi. L'augmentation de transmittance solaire au-delà des niveaux actuels (autour de 96-97%) ne sera possible qu'avec des matériaux à forte porosité (> 70%) déposés en architectures antireflet à deux, voire trois couches. Ainsi, on retrouve une transmittance solaire deux faces de 98,82 % pour un antireflet de deux couches de SiO₂ poreux et de 99,07 % pour trois couches (optimisation pour un spectre ASTM G173-03 DC). Ces voies sont les plus prometteuses que nous ayons identifiées pour augmenter la transmittance solaire au-delà des valeurs actuelles (voir chapitre I, Table 3 p.48), soit un gain de l'ordre de 0,5 à 3%. Des couches minces très poreuses nécessiteront cependant d'utiliser une couche de protection, faite par exemple d'oxydes denses, pour éviter leur dégradation mécanique et optique (par adsorption d'eau). Notre étude montre également que ces solutions antireflets poreuses sont peu sensibles aux variations de rugosité de surface, ainsi qu'aux erreurs expérimentales sur les épaisseurs de couches ou la porosité.

Pratiquement, il apparaît que l'efficacité des traitements antireflets solaires ne varie que très légèrement en fonction du lieu d'ensoleillement. Il n'est donc clairement pas nécessaire de considérer les différences entre spectres locaux dans ce cas d'application. Un antireflet solaire développé et caractérisé avec le spectre solaire de référence mondiale sera suffisamment efficace sur l'ensemble des sites favorables au CSP sur la planète. Dans le cas d'un collecteur solaire complet, il peut par contre s'avérer utile d'optimiser les couches antireflets en fonction du spectre solaire réfléchi par le(s) miroir(s), si ce(s) dernier(s) ont tendance à modifier notablement le spectre qu'ils reçoivent du soleil et réfléchissent vers la surface transparente. La transmittance solaire peut ainsi augmenter de quelques pourcents.

Après avoir étudié les surfaces réfléchissantes (chapitre IV) et transparentes antireflet (chapitre V), nous allons maintenant nous pencher sur les surfaces absorbantes. C'est l'objet du chapitre VI. Nous aurons ainsi un aperçu des performances et des voies possibles d'amélioration de collecteurs solaires complets.

Chapitre VI

Fonction absorptance : absorbeurs à sélectivité spectrale

I. Introduction du chapitre VI

Après avoir étudié les fonctions de réflexion (miroirs) et de transmission (vitres antireflet) du rayonnement solaire que l'on retrouve dans les collecteurs à concentration, nous traiterons dans ce chapitre de l'étape de conversion du flux solaire concentré en chaleur par l'absorbeur thermique. Cette chaleur a vocation à être ensuite transférée vers le fluide caloporteur parcourant l'absorbeur, à un niveau de température exploitable par un cycle thermodynamique pour la production d'électricité. Pour cela il est indispensable que la température du fluide caloporteur soit nettement supérieure à celle de l'environnement ambiant, ce qui génère inévitablement des pertes thermiques. Les absorbeurs thermiques, éléments indispensables de tous les types de collecteurs solaires à concentration, doivent donc absorber le flux solaire tout en minimisant les pertes thermiques pour une meilleure efficacité de conversion en chaleur.

Pour limiter les pertes thermiques, en particulier convectives, la première solution est de mettre sous vide l'absorbeur à l'intérieur d'un tube ou sous une vitre en verre, ce qui nécessite des interfaces transparentes (chapitre V). Une solution complémentaire consiste à limiter les pertes radiatives de l'absorbeur chaud par un traitement de surface adéquat utilisant des couches minces. Ce traitement, dit spectralement sélectif, parvient à concilier une forte absorption dans la gamme solaire et une faible émission dans l'infrarouge. L'objectif de ce chapitre est d'identifier, de modéliser puis d'optimiser des traitements sélectifs, en tenant compte des spécificités propres à chaque collecteur et/ou aux spectres solaires locaux.

II. Absorptance solaire, sélectivité et rendement héliothermique

2.1. Problématique générale

Les problématiques d'une centrale électrique solaire à concentration convertissant l'énergie solaire en électricité ($\eta_{\text{solaire} \rightarrow \text{électricité}}$) sont doubles :

- Il est d'abord nécessaire de convertir l'énergie solaire en énergie thermique ($\eta_{\text{solaire} \rightarrow \text{thermique}}$) pour chauffer le fluide caloporteur. Une absorptance solaire élevée est essentielle, de même que des pertes thermiques faibles. Pour limiter ces dernières, des températures d'absorbeur (T_{abs}) proches de la température de l'environnement (T_0) seraient préférables ($T_{\text{abs}} \approx T_0$).
- Il est cependant nécessaire de convertir en travail (puis en électricité grâce à une turbine et un alternateur) l'énergie thermique disponible ($\eta_{\text{thermique} \rightarrow \text{travail}}$). Une température d'absorbeur élevée par rapport à la température de l'environnement est dans ce cas nécessaire ($T_{\text{abs}} \gg T_0$).

Nous avons donc deux tendances opposées et il convient de faire un compromis entre une énergie thermique disponible élevée et de faibles pertes thermiques. L'équation (VI-1) décrit la conversion totale solaire $\rightarrow$ travail.

$$\eta_{\text{solaire} \rightarrow \text{travail}} = \eta_{\text{solaire} \rightarrow \text{thermique}} \cdot \eta_{\text{thermique} \rightarrow \text{travail}} \quad (\text{VI-1})$$

$$\eta_{\text{solaire} \rightarrow \text{travail}} = \frac{A_s \cdot C \cdot J_i - \sigma \cdot E_{CN}(T_{abs}) \cdot (T_{abs}^4 - T_0^4)}{C \cdot J_i} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{abs}}\right)$$

Dans cette équation, le rendement thermique $\rightarrow$ travail est choisi comme idéal, représenté par le rendement de Carnot avec T_{abs} la température de l'absorbeur et T_0 la température de l'environnement. Ce rendement augmente avec la température de l'absorbeur.

Le rendement solaire $\rightarrow$ thermique, ou rendement héliothermique, est le rapport des densités de flux concentré absorbé ($A_s \cdot C \cdot J_i$) diminué des pertes radiatives (loi de Stefan-Boltzmann [$\sigma \cdot E_{CN}(T_{abs}) \cdot (T_{abs}^4 - T_0^4)$]) sur la densité de flux incident concentré ($C \cdot J_i$). J_i est la densité de flux solaire provenant du soleil et incidente sur le miroir concentrateur (W/m^2), C est le taux de concentration, A_s l'absorptance solaire de l'absorbeur, $E_{CN}(T_{abs})$ l'émissivité « corps noir » de l'absorbeur à la température T_{abs} , et σ la constante de Stefan-Boltzmann. Le rendement héliothermique est un compromis entre flux absorbé et flux émis par l'absorbeur. Plus la température augmente, plus le flux émis devient important par rapport au flux absorbé, de sorte que le rendement héliothermique diminue lorsque la température augmente.

Considérons l'absorbeur comme un corps noir à T_{abs} , c'est-à-dire que $A_s = E_{CN} = 1$. En effet, par définition, l'absorptivité spectrale $\alpha(\lambda)$ et l'émissivité spectrale $\varepsilon(\lambda)$ sont telles que $\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) = 1$, quelle que soit la longueur d'onde λ . La Figure 100 (traits pleins) illustre dans ce cas le rendement de conversion d'une densité de flux solaire incidente ($J_i = 900 \text{ W/m}^2$) en travail, pour plusieurs taux de concentration C compris entre 10 et 5000. Nous obtenons une courbe en cloche qui présente un maximum : ainsi, pour chaque taux de concentration, il existe une température optimale pour laquelle le rendement de conversion de l'énergie solaire en travail est maximal. Cette température donne le meilleur compromis entre rendement de Carnot élevé et pertes radiatives faibles. Par exemple pour $C = 50$, l'optimum de rendement héliothermique (42,4%) est obtenu à $T_{abs} = 350^\circ\text{C}$ (620 K).

Le soleil peut être considéré comme un corps noir à 5800 K, qui émet dans un large domaine de longueurs d'onde principalement comprises entre 280 et 2500 nm (99,3% de la puissance incidente, les 0,7% restants étant émis entre 2500 et 4000 nm). Un absorbeur thermique, typiquement chauffé entre 100 et 800°C, émet quant à lui un rayonnement infrarouge, par exemple centré autour de 3,5 μm s'il est à 550°C. La loi de Kirchhoff (équation (I-2)) précise qu'à une température donnée, l'absorptivité spectrale $\alpha(\lambda)$ et l'émissivité spectrale $\varepsilon(\lambda)$ sont égales. Ainsi, obtenir à la fois une forte absorptivité et une faible émissivité pour une même longueur d'onde est impossible.

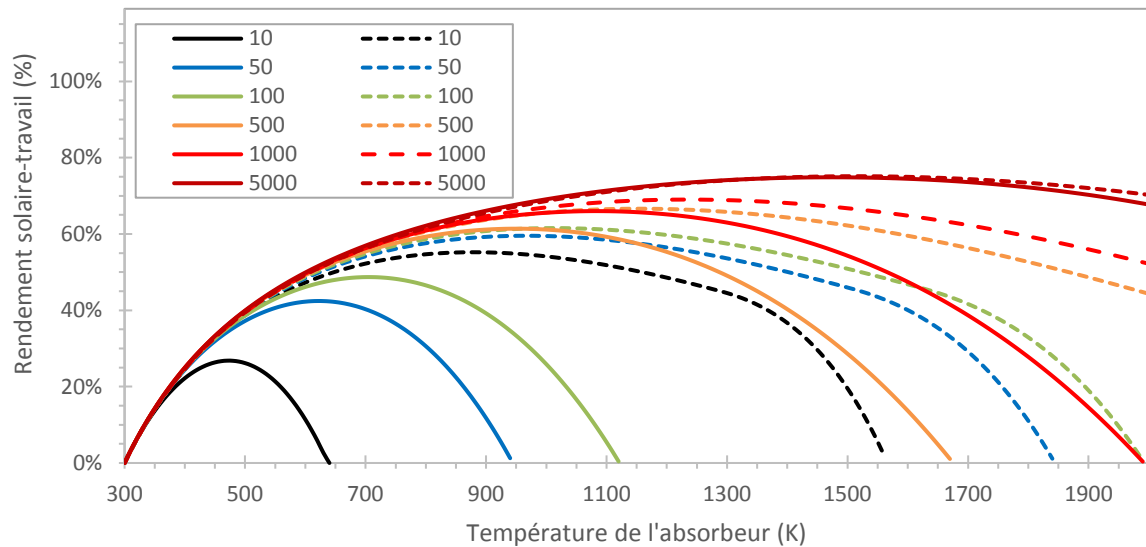


Figure 100 : Rendement de conversion de l'énergie solaire en travail en fonction de la température de l'absorbeur, pour plusieurs taux de concentration (de 10 à 5000), dans le cas d'un absorbeur corps noir (traits pleins) et d'un absorbeur sélectif idéal (pointillés)

Cependant dans notre cas, les plages de longueurs d'onde où l'on souhaite une absorption élevée (gamme solaire) et celle où l'on souhaite une émission faible pour limiter les pertes radiatives (infrarouge) sont relativement bien séparées. Il est donc possible, pour un absorbeur, d'absorber la majorité du rayonnement solaire ($A_s \rightarrow 1$) tout en limitant les pertes thermiques radiatives dans l'infrarouge ($E_{CN} \rightarrow 0$). Le comportement optique est radicalement opposé sur les deux plages spectrales et l'on parle alors de surfaces spectralement sélectives (voir chapitre I, §5.2 p.50). Le changement de comportement optique (de forte absorption à faible absorption = émission) a lieu à une longueur d'onde dite de coupure, λ_c , typiquement située entre 1,5 et 2,5 μm , selon la température de l'absorbeur. Pour une surface sélective parfaite, $\alpha(\lambda) = 1$ si $\lambda < \lambda_c$ et $\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) = 0$ si $\lambda > \lambda_c$.

Nous avons simulé le rendement de conversion solaire $\rightarrow$ travail d'une surface sélective parfaite ainsi définie. La longueur d'onde de coupure est optimisée à l'aide de notre algorithme pour maximiser la conversion solaire en travail (équation (VI-1)). Nous utilisons pour le calcul un spectre solaire ASTM G173-03 Direct et Circumsolaire (DC) d'irradiance 900 W/m^2 (de 280 à 4000 nm). L'absorptance solaire (A_s) et l'émittance corps noir (E_{CN}) de la surface spectralement sélective sont respectivement calculées à partir de l'absorptance spectrale ($1 - \text{réflectance spectrale}$) selon les équations (I-3) et (I-9) présentées dans le chapitre I. La Figure 100 (courbes en pointillés) illustre l'évolution avec la température de ce rendement de conversion pour des surfaces sélectives optimisées, à différents taux de concentration. La fréquence de coupure (λ_c) qui maximise le rendement est optimisée pour chaque couple concentration/température. L'utilité d'un absorbeur sélectif parfait par rapport à un absorbeur corps noir ($A_s = E_{CN} = 1$) est clairement visible, particulièrement pour les faibles concentrations ($C = 10$ et 50). Les surfaces sélectives, qui ont un E_{CN} bien plus faible, permettent en effet, à une température donnée, d'atteindre des rendements héliothermiques plus élevés, en réduisant la part de flux émis. Pour la même raison, le rendement héliothermique diminue moins

rapidement avec la température de l'absorbeur, de sorte que la température optimale maximisant le rendement solaire – travail, et le rendement solaire – travail correspondant, sont supérieurs à ceux obtenus avec une surface non sélective. Par exemple pour un taux de concentration de 10, une surface non sélective convertit au maximum 27% de l'énergie solaire en travail (à $T_{abs} = 470$ K) tandis qu'une surface sélective convertit jusqu'à 55% (à $T_{abs} = 860$ K).

Nous remarquons également que plus le taux de concentration est élevé, moins la différence de rendement entre les deux types de surfaces (sélective et non sélective) est marquée. Cela est dû au fait que les pertes radiatives sont contrebalancées par l'augmentation de la densité de flux incident avec le taux de concentration (équation (VI-1)). La diminution de E_{CN} (sélectivité) a donc moins d'impact sur le rendement lorsque C est élevé.

L'apport de la sélectivité spectrale pour les absorbeurs thermiques est donc indéniable. Cette analyse sera poursuivie dans le chapitre VII d'un point de vue thermodynamique. Nous allons voir dans la suite quelles solutions couches minces peuvent garantir cette sélectivité.

2.2. Solutions spectralement sélectives et méthode d'optimisation

Pour identifier les matériaux en couches minces permettant l'obtention d'une sélectivité spectrale, nous avons employé les deux méthodes présentées ci-après. La première consiste à optimiser des empilements sélectifs existants ou inspirés de la bibliographie. La deuxième consiste à considérer des matériaux théoriques et à rechercher leurs indices de réfraction optimaux permettant de maximiser le rendement héliothermique, puis dans un deuxième temps de rechercher des matériaux réels présentant ces indices.

Méthode 1 : optimisation de matériaux existants

La bibliographie concernant les couches minces à sélectivité spectrale est vaste. En effet, les revêtements sélectifs sont développés depuis les années 1970 [186], [187]. Ils sont présents sous de nombreuses formes et utilisent un grand nombre de matériaux [69], [188], [189], [52]. Nous avons classé les solutions connues d'absorbeurs spectralement sélectifs selon trois grandes catégories, en fonction de la possibilité que nous avons de les simuler et de les optimiser par les méthodes utilisées dans cette thèse (matrice de transfert [71]) (Figure 101).

Dans la majorité des cas, la sélectivité est obtenue par une succession de plusieurs couches minces de matériaux différents. C'est l'épaisseur des couches minces et la différence d'indice de réfraction complexe entre les matériaux qui permet l'absorption solaire. La faible émissivité infrarouge garantissant la sélectivité est quant à elle majoritairement assurée par le substrat métallique et/ou par la couche métallique de l'empilement.

Dans la première catégorie, des alternances de matériaux ayant des propriétés optiques très différentes sont utilisées, le plus souvent des métaux alternés avec des diélectriques, ou des composites métal-diélectrique (cermet). Ces absorbeurs sont facilement modélisables avec notre méthode car les indices de réfraction des matériaux constitutifs sont disponibles dans la bibliographie ou, pour les composites, modélisables avec la théorie EMA (Effective Medium Approximation, chapitre I §5.4 p.58).

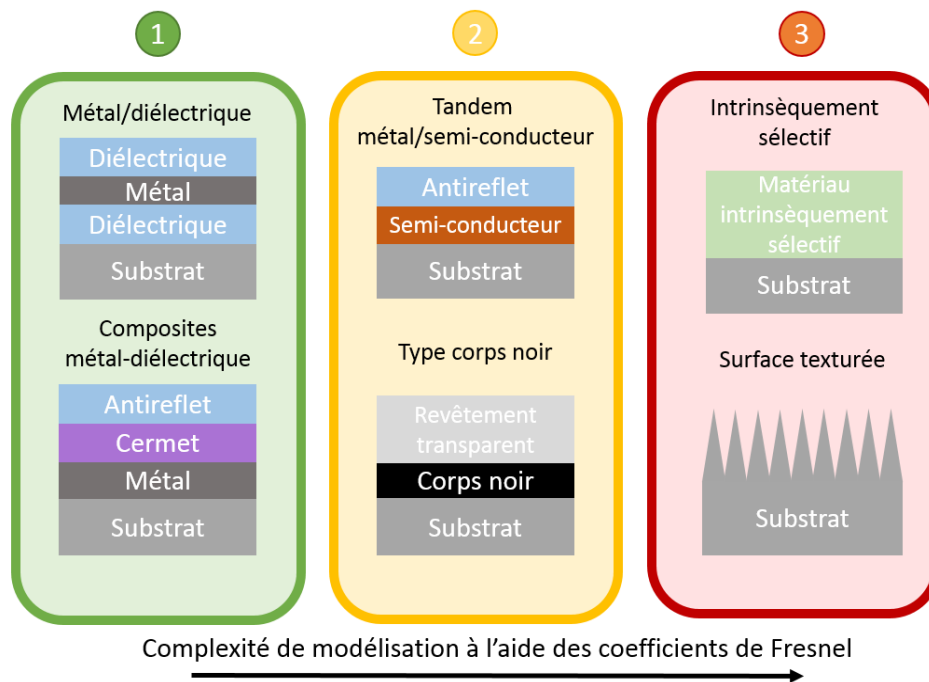


Figure 101 : Principaux types d'absorbeurs sélectifs [189]

Dans les autres catégories, on trouve des matériaux particuliers, comme des semi-conducteurs dopés [190], des corps gris presque noirs ($\alpha = \varepsilon \approx 1$) [189], des matériaux intrinsèquement sélectifs, pour lesquels il est très difficile d'obtenir les indices de réfraction complexes dans la bibliographie. La sélectivité peut également être obtenue par une texturation de surface adaptée [191], mais l'étude de cette texturation demande l'utilisation des méthodes FDTD qui sortent du cadre de cette thèse.

Nous nous sommes donc concentrés sur la première catégorie, les absorbeurs multicouches constitués de couches métalliques, diélectriques ou composites que nous pouvons aisément modéliser et qui sont en outre les plus performants [188], [189], [192], [193], [194]. Plusieurs structures multicouches seront considérées :

- **Empilement de couches minces métalliques et diélectriques.** Ce type d'absorbeur se développe depuis 1975 avec le premier empilement baptisé « AMA » [191]. Cet absorbeur historique était constitué d'une alternance Alumine (Al_2O_3) / Molybdène (Mo) / Alumine (Al_2O_3). Depuis, de nombreuses études ont utilisé différents métaux (Ag, Al, Cu, Cr, Mo, Ni, Ti, W, Pt) et diélectriques (Al_2O_3 , AlN, SiO_2 , MgF_2 , ZnS, Si_3N_4 , SiCH) [194]. Dans ces structures, nous trouvons trois à cinq couches minces alternées.
- **Empilement contenant des couches composites métal-diélectrique (cermet).** Ces absorbeurs utilisent une ou plusieurs couches minces de type cermet qui peuvent être modélisées grâce aux EMA. Un cermet (noté A-B) est composé d'une matrice céramique (A) contenant des inclusions métalliques (B). De très nombreux matériaux peuvent servir de constituants pour des cermets. Les plus cités pour les traitements sélectifs sont : Al-AlN, Cr- Cr_2O_3 , Mo- Al_2O_3 , Mo- SiO_2 , Pt- Al_2O_3 , W- Al_2O_3 , W-AlN [189], [194], [195]. Dans ces structures et afin de rendre l'empilement plus performant, on trouve parfois une sous-couche métallique entre le cermet et le substrat, souvent constituée de l'élément métallique

du cermet, ainsi qu'une couche antireflet au sommet de l'empilement, souvent constituée du matériau diélectrique du cermet, afin de faciliter la fabrication. On retrouve par exemple des traitements multicouches W/W-Al₂O₃/Al₂O₃, composés d'une couche de tungstène W surmontée d'un cermet W-Al₂O₃ puis d'une couche antireflet Al₂O₃ [188]. Le cermet peut de plus présenter un gradient de propriétés optiques en faisant varier le taux d'inclusions métalliques dans la matrice céramique [189]. Les possibilités sont donc très variées. Plusieurs absorbeurs sélectifs industriels utilisent cette technologie [188].

Nous tenterons dans la suite d'optimiser ces deux grands types d'empilements afin de maximiser, si possible, leur rendement héliothermique.

Méthode 2 : recherche de matériaux idéaux

Une autre méthode consiste à optimiser des empilements idéaux dont les couches sont identifiées uniquement par leurs indices optiques complexes, puis de chercher dans un deuxième temps les classes de matériaux qui peuvent satisfaire les critères d'indices recherchés. Le principe de base est de maximiser le rendement héliothermique d'un empilement aléatoire contenant de une à quatre couches minces composées de matériaux « théoriques » (Figure 102), c'est-à-dire dont l'indice de réfraction complexe est généré aléatoirement tel que :

- L'indice de réfraction réel (n) soit compris entre 1 et 3,
- Le coefficient d'extinction (k) soit compris entre 0 et 10,
- L'indice de réfraction complexe ($N = n + ik$) soit invariant avec la longueur d'onde.

Cette méthode permet de générer aléatoirement des structures virtuelles, parmi lesquelles figurent des couches minces d'indices $n < 1$ et $k > 5$, caractéristiques des métaux, des couches minces à caractère diélectrique ($n \approx 1$, $k \approx 0$), ou des matériaux composites d'indices intermédiaires ($1 < n < 3$ et $1 < k < 5$).

Pour chaque structure multicouche générée aléatoirement, notre algorithme permet d'optimiser l'épaisseur respective de chacune des couches minces dans la structure afin de maximiser son rendement héliothermique, ici calculé à $C = 80$, $T_{abs} = 823$ K (550°C) et $J_i = 900$ W/m² (spectre solaire ASTM G173-03 DC). On obtient ainsi un grand nombre d'empilements optimisés, qui sont ensuite triés selon leur rendement héliothermique, afin d'identifier les structures les plus performantes.

La Figure 103 illustre les types de structures conduisant à des rendements héliothermiques supérieurs à 90%. Un code couleur est adopté pour différencier les trois tendances principales sur les indices optiques, pouvant être identifiées à des types de matériaux existants (métallique, diélectrique ou composite).

$$N = n + ik \quad \begin{matrix} 1 < n < 3 \\ 0 < k < 10 \end{matrix} \quad dN/d\lambda = 0, \forall \lambda$$

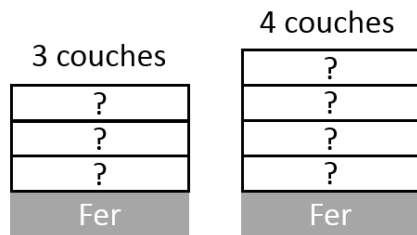


Figure 102 : Génération aléatoire d'empilements constitués de matériaux théoriques

- Tendance métallique : $n \ll$ et $k \gg$
- Tendance diélectrique : $n \approx 1$ et $k \approx 0$
- Tendance composite : $1 < n < 3$ et $1 < k < 5$

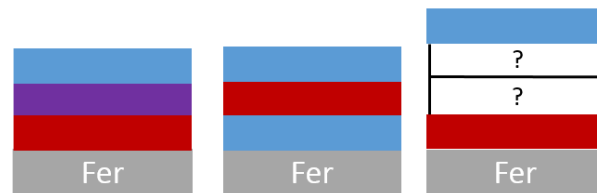


Figure 103 : Structures d'empilements et types de matériaux assurant un rendement héliothermique élevé

Cette pré-étude permet de dégager plusieurs tendances. Tout d'abord une couche mince seule ne peut conduire à un rendement héliothermique élevé ($> 90\%$). Les rendements héliothermiques supérieurs à 90% ne sont obtenus qu'à partir de trois couches minces. Ensuite, des empilements multicouches très divers contenant des métaux, des diélectriques et/ou des cermets peuvent présenter des rendements héliothermiques élevés. On retrouve en particulier les empilements trois couches de type « métal/composite/diélectrique » et « diélectrique/métal/diélectrique » identifiés dans la bibliographie (Figure 101, cas 1). Des empilements à quatre couches minces donnent aussi de bons résultats. Dans ce cas, seules la première et la dernière couches doivent avoir un comportement optique démarqué (respectivement métal et diélectrique), les conditions d'indices sur les deux autres couches sont plus souples. Enfin, nous notons que dans ces empilements, les couches à tendance diélectrique avec des indices de réfraction faibles ($n < 2$) sont à privilégier par rapport à des indices de réfraction élevés ($n > 2$). Les matériaux type diélectriques doivent également être le plus transparent possible (k tend vers 0), car ceux présentant une indice de réfraction faible ($n \approx 1$) mais un coefficient d'extinction non nul ($k > 0$) sont naturellement écartés lors de l'optimisation.

Bilan

Après l'étude bibliographique et la pré-étude théorique, nous avons choisi de nous concentrer sur l'optimisation de revêtements sélectifs constitués d'empilements de trois couches minces ou plus, composées de métaux, de diélectriques et/ou de cermets, sans texturation de surface. Le but est d'explorer les multiples possibilités parmi les matériaux existants, d'étudier le fonctionnement de ces empilements, et de maximiser leur rendement héliothermique.

2.3. Rôles respectifs des couches minces dans un empilement sélectif

Nous avons cherché à identifier le rôle de chaque couche mince d'un empilement sur la propriété globale de sélectivité spectrale. Pour cela, nous avons pris l'exemple d'un empilement quatre couches métal/diélectrique W/SiCH/W/SiCH développé au laboratoire PROMES [89].

A partir des indices optiques mesurés individuellement sur chacune des couches constituant l'empilement (W et SiCH), nous avons calculé la réflectance spectrale, en reconstituant l'empilement couche par couche, depuis la première couche jusqu'à l'empilement complet (Figure 104).

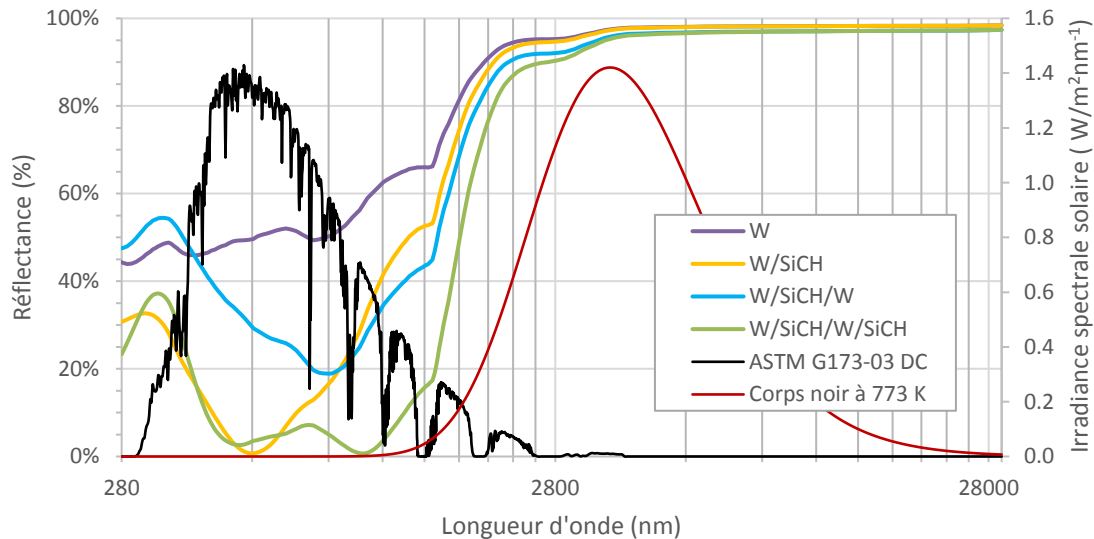


Figure 104 : Réflectance spectrale couche par couche d'un empilement sélectif W/SiCH/W/SiCH développé à PROMES [89] comparée au spectre solaire et au spectre du corps noir à 500°C (pondéré)

Nous constatons qu'il est difficile d'attribuer un rôle particulier à chaque couche mince. La première couche (courbe violette) illustre la naissance de l'empilement avec une couche de W, qui est fortement réflecteur dans l'infrarouge (traduisant une faible émissivité), avec un effet intrinsèquement sélectif notable mais insuffisant (absorptance spectrale autour de 50% dans la gamme solaire). Avec l'ajout de la seconde couche mince (SiCH, courbe jaune), nous remarquons une baisse de la réflectance, très marquée dans le visible et peu marquée dans l'infrarouge, caractéristique de la nature sélective de ce bicouche, dont les performances peuvent cependant encore être améliorées. La seconde couche de W (courbe bleue) augmente à nouveau la réflectance dans le spectre solaire. La dernière couche de SiCH (courbe verte) diminue drastiquement la réflectance dans le spectre solaire, garantissant une absorptance solaire élevée, et diminue seulement légèrement la réflectance dans l'infrarouge, ne pénalisant pas la faible émittance de l'empilement.

Ainsi, les couches de SiCH jouent principalement un rôle d'antireflet pour les métaux de l'absorbeur, sur la totalité du spectre de 280 nm à 30 μm , et plus particulièrement en dessous de la fréquence de coupure (vers 1,8 μm). Les couches de W ont un rôle moins clair, puisqu'elles agissent à la fois comme absorbeur solaire partiel et réflecteur infrarouge. Leur rôle peut même sembler parfois contre-productif, puisque la seconde couche de W fait diminuer l'absorptance solaire par rapport à un bicouche W/SiCH. Pourtant l'empilement complet quatre couches a bien au final un comportement spectralement sélectif plus marqué que le bicouche.

Le phénomène de sélectivité spectrale est donc assuré par l'association des couches minces. En conséquence, la recherche de matériaux pour les empilements sélectifs ne peut pas simplement s'effectuer sur la base du comportement optique d'un matériau pris isolément. Pour garantir la sélectivité, chaque matériau doit être placé dans une architecture complète, qui doit être optimisée. De plus, les conditions opératoires ont une influence notable sur les performances de l'empilement, comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant.

2.4. Rôles du taux de concentration et de la température

Sur l'exemple d'un empilement sélectif W/W-Al₂O₃/SiO₂, composé d'une couche mince métallique (W), d'une couche absorbante cermet (W-Al₂O₃) et d'une couche antireflet superficielle (SiO₂) (Figure 105), nous avons cette fois étudié la sensibilité de l'optimisation de l'empilement, à travers le rendement héliothermique, vis-à-vis du taux de concentration et de la température de l'absorbeur.

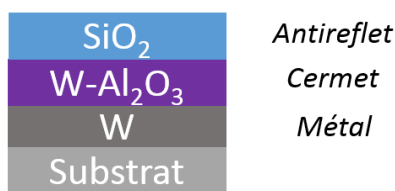


Figure 105 : Exemple d'empilement spectralement sélectif W/W-Al₂O₃/SiO₂

Composition de l'empilement optimal en fonction des conditions opératoires

Le but est ici d'étudier l'impact du taux de concentration et de la température sur les performances de l'empilement et sur sa composition optimale correspondante. Le domaine d'étude correspond à un taux de concentration C variant entre 10 et 300 pour une température T dans le domaine [323 ; 873] K (soit [50 ; 600] °C). Les épaisseurs des trois couches peuvent varier entre 0 et 200 nm et le taux d'inclusions métalliques dans le cermet entre 0 et 100%. La Figure 106 présente le rendement héliothermique de l'empilement sélectif optimisé par notre algorithme, en fonction des variables C et T .

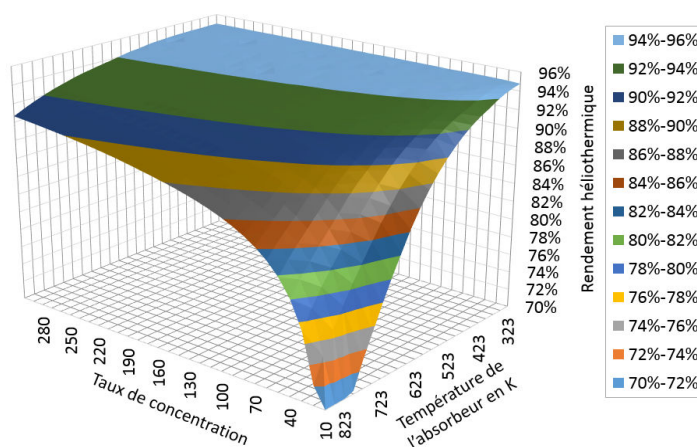


Figure 106 : Rendement héliothermique d'un empilement sélectif W/W-Al₂O₃/SiO₂ optimisé, en fonction du taux de concentration et de la température de l'absorbeur

Le rendement héliothermique dépend comme attendu de la température de l'absorbeur et du taux de concentration. Les meilleurs rendements (94-96%) sont obtenus pour des températures d'absorbeur faibles, en particulier aux concentrations élevées. A l'inverse, les plus bas rendements (70-72%) sont obtenus pour C faible et T élevé. Cela dit, ces dernières conditions ne sont pas réalisables expérimentalement, car un taux de concentration faible ne permet pas d'atteindre des températures élevées. Ces évolutions s'expliquent simplement par une analyse dimensionnelle de l'équation du rendement héliothermique (voir §2.1, p.191). En effet, une température basse limite les pertes radiatives et une concentration élevée fait augmenter la part de flux absorbé.

La Figure 107 illustre l'absorptance solaire et l'émissance corps noir de l'empilement sélectif. L'absorptance solaire représente la densité de flux solaire absorbée par l'empilement par rapport à la densité de flux solaire incidente (chapitre I, équation (I-3)). L'émissance corps noir représente la densité de flux émise par l'empilement par rapport à celle qui serait émise par un corps noir à la même température (chapitre I, équation (I-9)).

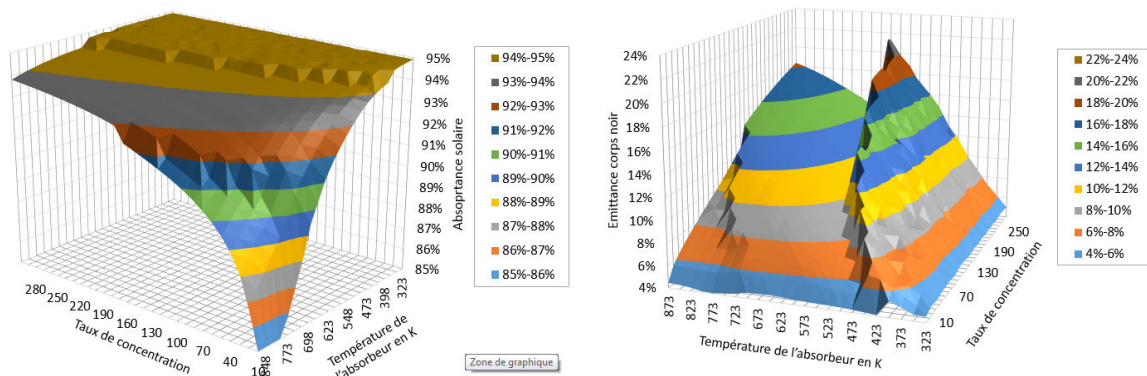


Figure 107 : À gauche, absorptance solaire d'un empilement spectralement sélectif optimisé W/W-Al₂O₃/SiO₂, à droite, émissance corps noir, en fonction du taux de concentration et de la température de l'absorbeur

On observe trois zones distinctes, en fonction du couple température/concentration : chaque zone est visible par une cassure sur les deux graphiques.

1. **Zone 1** : pour des températures d'absorbeur faibles ($T < 200^{\circ}\text{C}$ (473 K)), quel que soit le taux de concentration, le rendement héliothermique optimal (Figure 106) est obtenu en maximisant l'absorptance solaire (93-95%), indépendamment de l'émissance corps noir. On observe en effet un plateau sur l'absorptance solaire tandis que l'émissance corps noir varie fortement avec la température (en T^4). L'émissance corps noir a donc très peu d'influence sur le rendement héliothermique dans ce domaine de température et il n'est pas nécessaire de la minimiser pour garantir un rendement héliothermique élevé.
2. **Zone 2** : pour des températures d'absorbeur et taux de concentration modérés ($200^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$ (673 K) et $C > 80$), l'optimisation du rendement héliothermique doit tenir compte de l'absorptance solaire et de l'émissance corps noir. Il est nécessaire de faire un compromis. L'absorptance solaire est en effet plus faible que dans la zone 1 et varie avec C et T , tandis que l'émissance corps noir varie moins drastiquement que précédemment, c'est-à-dire que l'optimisation cherche également à la minimiser.

3. **Zone 3** : la troisième zone concerne les hautes températures ($T > 400^{\circ}\text{C}$ (623 K)) et les taux de concentration faibles ($C < 80$), où le rendement héliothermique est bas (inférieur à 90%, Figure 106). Nous observons une seconde rupture sur la Figure 107 dans cette zone. Elle correspond à la chute rapide de l'absorptance solaire. Cette rupture apparaît de la même façon sur les variations de l'émittance corps noir qui diminue également. L'optimisation privilégie donc les faibles émittances corps noir pour maximiser le rendement héliothermique, mais celui-ci reste limité car l'absorptance solaire n'est pas maximisée par l'optimisation.

Nous observons donc trois modes de fonctionnement pour les absorbeurs sélectifs, qui dépendent de la grandeur (absorptance solaire ou émittance corps noir) qui gouverne lors de l'optimisation. Nous retrouvons ainsi une première zone où une forte absorptance solaire prédomine. Vient ensuite une zone de compromis entre absorptance solaire et émittance corps noir. Enfin, dans la dernière zone, c'est l'émittance corps noir qui prédomine.

La Figure 108 illustre l'épaisseur (gauche) et la fraction volumique (droite) (ou taux d'inclusion, soit le pourcentage en volume de particules métalliques dans la matrice diélectrique) optimisées du cermet W-Al₂O₃ de l'empilement, menant aux rendements héliothermiques maximaux. Nous y retrouvons les trois mêmes zones assez distinctes.

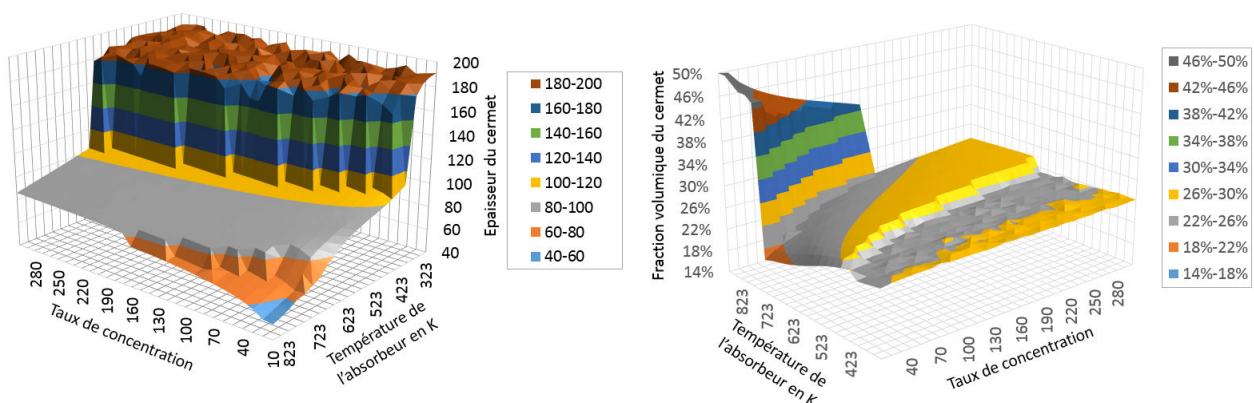


Figure 108 : À gauche, épaisseur du cermet W-Al₂O₃, à droite, fraction volumique (part de W), en fonction du taux de concentration et de la température

1. **Zone 1** : pour des températures faibles ($T < 200^{\circ}\text{C}$), quel que soit le taux de concentration, l'épaisseur et la fraction volumique du cermet sont constantes. L'épaisseur est proche de la valeur maximale (de 180 à 200 nm, zone marron en haut de la figure de gauche) et la fraction volumique est constante, très proche de 26% (plateau jaune et gris en bas à droite de la figure de droite). Cette zone coïncide avec le plateau d'absorptance solaire élevée.
2. **Zone 2** : pour des températures et concentrations modérées ($200^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$, $C > 80$), on observe une chute brutale de l'épaisseur du cermet (Figure 108, gauche) par rapport à la zone précédente, pour atteindre un plateau d'épaisseurs comprises entre 80 et 100 nm (en gris). Dans le même temps, la fraction volumique (droite) augmente légèrement puis suit l'évolution du couple concentration/température. On retrouve des fractions volumiques entre 22 et 30% (en gris et jaune au centre du graphique).

3. **Zone 3** : pour la dernière zone, celle des plus hautes températures alliées à des taux de concentration faibles ($T > 400^{\circ}\text{C}$, $C < 80$), l'épaisseur du cermet (Figure 108, gauche) diminue encore (entre 40 et 80 nm) tandis que sa fraction volumique (droite) augmente considérablement jusqu'à un maximum de 50%. Ces caractéristiques permettent de limiter l'émittance corps noir (Figure 107), mais diminuent l'absorptance solaire, donnant lieu au rendement héliothermique maximal dans cette gamme, bien que faible (Figure 106).

Enfin, la Figure 109 décrit l'évolution en fonction de la température et du taux de concentration des épaisseurs optimisées de la couche antireflet en SiO_2 (gauche) et de la couche mince métallique W (droite) qui permettent de maximiser le rendement héliothermique. On retrouve les trois zones précédentes pour chaque couche mince.

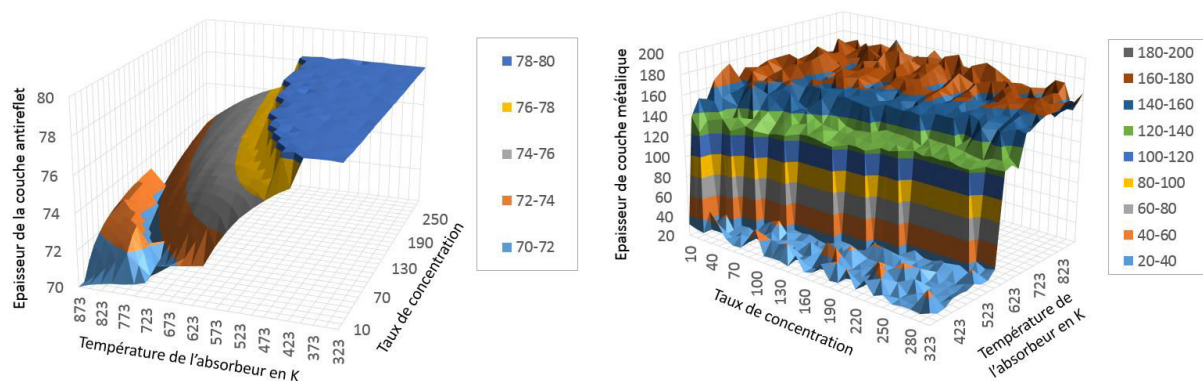


Figure 109 : Epaisseurs optimisées de la couche antireflet de SiO_2 (gauche) et de la couche métallique de W (droite), en fonction du taux de concentration et de la température

- **Couche antireflet.** L'épaisseur de la couche antireflet SiO_2 qui termine l'empilement (Figure 109, gauche) suit les évolutions du taux d'inclusion du cermet (Figure 108, droite), qui influe sur l'indice de réfraction de ce dernier. En effet, comme vu dans le chapitre précédent sur les antireflets, l'épaisseur optimale de la couche antireflet est directement liée à son indice de réfraction (équation (V-4)), lui-même lié à l'indice de réfraction de la couche immédiatement inférieure (équation (V-3)). En conséquence, une évolution de la composition du cermet (couche inférieure) entraîne une évolution de l'épaisseur de la couche antireflet. Nous retrouvons donc à nouveau les trois zones décrites précédemment. La zone 1 (T faible, quel que soit C) est ici un plateau (en bleu) d'épaisseur constante, entre 78 et 80 nm, la fraction volumique du cermet étant constante. La zone 2 (T et C intermédiaires) est représentée par une diminution progressive de l'épaisseur optimale de la couche antireflet, de 78 nm à 72 nm, lorsque la fraction volumique du cermet évolue modérément. La dernière zone (T élevée, C faible) est représentée par des épaisseurs comprises entre 70 et 74 nm qui semblent être croissantes puis décroissantes, tandis que la fraction volumique du cermet augmente.
- **Couche métallique.** Nous retrouvons également les trois zones pour la couche métallique (Figure 109 droite). Pour des températures faibles et des concentrations moyennes à élevées (zone 1, en bleu clair sur la figure), l'épaisseur optimale de la couche métallique peut être faible, de l'ordre de 20 à 60 nm. En effet, la couche métallique a pour rôle principal de réduire l'émittance corps noir et influe peu sur l'absorptance solaire, elle n'est donc pas

primordiale dans cette zone où l'absorptance est privilégiée par l'optimisation. Cette épaisseur correspond à celle nécessaire pour masquer presque entièrement le substrat (1,8% de transmittance solaire pour 60 nm de W). Pour des températures et concentrations modérées (zone 2), l'épaisseur optimale est comprise entre 120 et 140 nm, puis entre 160 et 180 nm pour la troisième zone, celle des hautes températures et des faibles taux de concentration, au fur et à mesure que l'émittance corps noir est également minimisée par l'optimisation. Dans ce cas, la zone 3 inclut aussi les couples T et C élevés. Notons que l'allure de la courbe est plus chaotique que les précédentes. Les zones sont toujours démarquées, mais pas parfaitement lisses. Cela suggère que l'impact de l'épaisseur de la couche métallique sur le rendement héliothermique a moins d'importance que les autres variables car l'optimisation est moins précise sur ce paramètre. Cette étude est poursuivie dans le paragraphe III p.204.

Bilan

Cette analyse montre qu'il existe trois domaines de valeurs optimales pour la structure (épaisseurs et composition) d'un empilement spectralement sélectif de trois couches minces de type métal/cermet/diélectrique, selon le couple taux de concentration/température, qui maximisent le rendement héliothermique. Ces domaines découlent directement de la définition de ce rendement (équation (VI-1)) et permettent de jouer sur l'importance relative de la densité de flux absorbée (dépendant de la concentration et de l'absorptance solaire) et de la densité de flux émise (dépendant de la température et de l'émittance corps noir).

Le premier domaine (zone 1) correspond aux températures faibles ($T < 200^{\circ}\text{C}$) quel que soit le taux de concentration (et en particulier aux taux de concentration plus élevés, $C > 150$). Dans cette zone, c'est l'absorptance solaire qui est prépondérante pour maximiser le rendement héliothermique. Cela entraîne des épaisseurs optimales de couches minces (métallique, cermet et antireflet) et une composition (fraction volumique) du cermet très constantes. Les empilements optimisés pour cette zone sont identiques entre eux. Il est donc industriellement possible de concevoir un traitement sélectif qui sera optimum pour toute la plage de température/concentration dans ce domaine. Ces niveaux de température correspondent plutôt aux applications solaires thermiques (production de chaleur, eau chaude, climatisation) qu'à la production d'électricité.

Pour le deuxième domaine (zone 2), correspondant à des températures et taux de concentration intermédiaires ($200^{\circ}\text{C} < T < 400^{\circ}\text{C}$, $C > 80$), l'empilement spectralement sélectif doit permettre un compromis entre absorptance solaire élevée et émittance corps noir faible. Tous les paramètres de l'empilement (épaisseurs des couches minces et fraction volumique du composite) évoluent avec le couple concentration/température. Chaque traitement sélectif optimisé dans cette zone est ainsi différent des autres. Dans ce domaine, l'empilement sélectif peut et doit donc être spécialement adapté aux conditions spécifiques de fonctionnement de la technologie CSP envisagée (température et concentration). Ce domaine correspond typiquement aux technologies cylindro-parabolique et Fresnel / huiles pour la production de chaleur et/ou d'électricité.

Le troisième domaine (zone 3) correspond aux plus hautes températures ($T > 400^{\circ}\text{C}$) et aux taux de concentration limités ($C < 80$). L'émissivité corps noir est le mécanisme prépondérant à la place de l'absorptance solaire dans l'optimisation du rendement héliothermique. Cela peut entraîner des changements radicaux dans la composition du traitement sélectif (épaisseurs, fraction volumique) par rapport aux autres zones et entre deux couples (C , T). Par exemple la fraction volumique du cermet peut passer de 22-26% (zone 2) à plus de 40% dans cette zone (Figure 108). Les variations de composition entre deux couples concentration/température sont très importantes. Pour cette zone, il est donc primordial d'optimiser le traitement sélectif pour une concentration et une température très précises. Notons qu'il peut s'avérer concrètement difficile d'atteindre des températures de fonctionnement élevées si les taux de concentration sont très faibles.

Enfin, il est intéressant de préciser que pour les couples C et T élevés (C jusqu'à 300 et T jusqu'à 600°C dans notre étude), pouvant correspondre aux cas des centrales à tour ou des centrales linéaires (cylindro-parabolique, Fresnel) à haut niveau de performance (utilisant pour fluide caloporteur de la vapeur ou des sels fondus), le comportement optimal de l'empilement correspond le plus souvent à la zone 2, c'est-à-dire que l'absorptance solaire et l'émissivité corps noir doivent être adaptées au couple (C , T).

A la lumière de ces constats, nous étudierons systématiquement dans la suite les revêtements sélectifs pour différents couples concentration/température.

III. Optimisation de revêtements sélectifs

Après avoir étudié le fonctionnement de traitements sélectifs en analysant le rôle de chaque couche mince et en étudiant comment l'épaisseur et la composition optimales des couches minces peuvent et doivent nécessairement être adaptées aux conditions opératoires (concentration, température) du collecteur solaire, nous allons maintenant étudier l'impact de la nature des matériaux employés dans les revêtements sélectifs, ainsi que de la structure et de l'agencement de ces derniers, sur leurs performances d'absorption sélective, afin d'identifier les structures et matériaux les plus à même de maximiser le rendement héliothermique.

3.1. Sélection de matériaux pour revêtements sélectifs

De très nombreux matériaux sont utilisables pour réaliser des empilements spectralement sélectifs [189], [192] : métaux, diélectriques et cermets (composites métal-diélectrique). Pour une structure équivalente de revêtement sélectif, c'est-à-dire un même nombre de couches minces et une répartition identique de celles-ci dans l'empilement (par exemple trois couches métal/cermet/diélectrique), les possibilités d'empilements sont donc grandes, notamment en ce qui concerne les cermets, car il en existe autant qu'il y a de combinaisons possibles entre un métal et un diélectrique.

Nous avons identifié par une étude bibliographique les principaux matériaux utilisés dans les empilements spectralement sélectifs (liste non exhaustive) : pour les métaux, Ag, Al, Au, Co, Cr, Cu, Fe, In, Ir, Mo, Mn, Ni, Pb, Pd, Pt, Sn, Ta, Ti, V, W, Zn, Zr ; pour les diélectriques, Al_2O_3 , AlN , Cr_2O_3 , MgF_2 , MgO , Si_3N_4 , SiCH , SiNCH , SiO_2 , Ta_2O_3 , ZnO , ZrO_2 . Les références bibliographiques donnant les indices de réfraction complexes de ces matériaux dans un large domaine spectral sont données en annexes (§6.1, p.297).

Grâce à notre algorithme (voir chapitre II), nous avons maximisé le rendement héliothermique de nombreuses solutions multicouches optimisées basées sur ces matériaux, pour quatre taux de concentration ($C = 10, 30, 80$ et 120) et deux températures ($T = 573$ et 823 K, soit 300 et 550°C). Nous avons choisi des empilements spectralement sélectifs simples constitués de trois couches : une couche métallique, un cermet (mélange métal-diélectrique décrit par EMA) et une couche antireflet (CAR) (Figure 105). Nous avons prospecté un total de 58 combinaisons d'empilements, en faisant varier les matériaux utilisés pour chacune des couches minces [189], [192] (voir annexe §6.2, p.298 pour le cas $C = 80$ et $T = 823$ K). Les résultats nous permettent d'étudier le rendement héliothermique (rH) en fonction des matériaux utilisés et du couple concentration (C) / température d'absorbeur (T). Les meilleurs résultats obtenus sont synthétisés dans la Table 24 (A_s est l'absorptance solaire, E_{CN} l'émittance corps noir à T).

Table 24 : Exemples d'empilements métal/cermet/CAR assurant le meilleur rendement héliothermique en fonction du taux de concentration (C) et de la température (T)

C	T (K)	Métal	Cermet	CAR	A_s	E_{CN}	rH
10	573	Zr	Ta-SiO ₂	SiO ₂	96,7%	3,6%	95,6%
30	573	Zr	Ta-SiO ₂	SiO ₂	96,5%	3,3%	93,5%
80	823	Zr	Ta-SiO ₂	SiO ₂	95,8%	7,2%	92,2%
120	573	Zr	Ta-SiO ₂	SiO ₂	96,7%	3,8%	96,4%
120	823	Zr	Ta-SiO ₂	SiO ₂	96,3%	8,3%	93,5%
10	823	Ag	Ag-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	89,1%	1,5%	83,1%
30	823	Mo	Au-SiO ₂	SiO ₂	93,7%	4,1%	88,1%
80	573	Mo	Au-SiO ₂	SiO ₂	93,7%	4,1%	88,1%
80	823	Mo	Au-SiO ₂	SiO ₂	94,1%	4,6%	91,8%

La Table 24 et la Table 54 (annexe p.298) montrent que pour un même couple concentration/température ($C = 80$ et $T = 823$ K), certains matériaux mènent à un rendement héliothermique plus élevé que d'autres. Cependant aucun matériau ne se dégage comme étant le plus performant indépendamment du couple concentration/température considéré. Le meilleur rendement héliothermique, au regard des cas étudiés, est atteint avec des matériaux différents pour différents couples (C , T). Si nous souhaitons optimiser un empilement spectralement sélectif, il est donc indispensable de connaître les conditions opératoires dans lesquelles il sera utilisé pour sélectionner en conséquence les matériaux adéquats.

3.2. Sélection d'antireflets pour revêtements sélectifs

Afin d'augmenter le rendement héliothermique, en diminuant les pertes par réflexion, et/ou pour protéger les couches sous-jacentes de l'environnement, les couches superficielles antireflet sont très couramment utilisées pour les revêtements sélectifs. Nous avons donc étudié le cas de diverses structures et matériaux antireflets afin de préconiser les plus adaptés.

Sélection de la structure de l'antireflet (monocouche ou multicouche)

Sur la base d'une solution multicouche sélective de base de type cermet W-Al₂O₃ sur W (W/W-Al₂O₃) nous avons étudié l'effet sur le rendement héliothermique de diverses structures de couches antireflets, constituées des matériaux diélectriques suivants : AlN, Al₂O₃, MgF₂, CaF₂, SiO₂, TiO₂ et ZnO. Ces derniers sont connus pour leur tenue en température, comme en témoigne la bibliographie [190], [195], [196], [197]. Comme précédemment, nous étudions quatre taux de concentration ($C = 10, 30, 80$ et 120) et deux températures d'absorbeur thermique ($T = 573$ K et 823 K, soit 300°C et 550°C). Nous avons ainsi calculé et optimisé les performances d'empilements sélectifs munis en surface de monocouches ou multicouches antireflet inspirées des structures identifiées dans le chapitre V. Pour ces structures antireflets, un gradient d'indice de réfraction décroissant du cermet vers l'ambiant est nécessaire. Notons qu'à 600 nm, $n(\text{ZnO}) = 2$, $n(\text{SiO}_2) = 1,47$ et $n(\text{MgF}_2) = 1,38$.

La Table 25 synthétise les meilleurs résultats obtenus pour le multicouche W/W-Al₂O₃ muni d'antireflets constitués d'une à trois couches des matériaux cités. Les valeurs et notations en vert correspondent aux meilleurs rendements héliothermiques obtenus (rH) ainsi qu'aux structures antireflets correspondantes (les matériaux sont notés du cermet vers le milieu ambiant) et leurs absorptance solaire et émittance corps noir. Notons que pour chaque optimisation, les épaisseurs optimales de toutes les couches (multicouche sélectif et monocouche ou multicouche antireflet) varient. Elles ne sont pas rapportées ici.

Table 25 : Rendement héliothermique d'un empilement W/W-Al₂O₃ avec une à trois couches antireflet (CAR), en fonction de la concentration et de la température

C	T	rH 1 CAR	rH 2 CAR	rH 3 CAR	Structure CAR donnant rH max	A_s	$E_{CN}(T)$
10	573 K	90,03%	90,06%	90,07%	ZnO/SiO ₂ /MgF ₂	93,50%	3,80%
30	573 K	92,56%	93,50%	93,46%	SiO ₂ /MgF ₂	95,91%	8,04%
80	573 K	93,64%	95,35%	95,17%	SiO ₂ /MgF ₂	96,80%	12,91%
120	573 K	93,89%	95,88%	95,68%	SiO ₂ /MgF ₂	96,99%	14,82%
10	823 K	68,52%	68,50%	68,50%	MgF ₂	86,74%	4,49%
30	823 K	82,53%	82,51%	82,48%	MgF ₂	91,01%	6,28%
80	823 K	88,53%	88,71%	88,56%	SiO ₂ /MgF ₂	94,37%	11,18%
120	823 K	90,02%	90,68%	90,58%	SiO ₂ /MgF ₂	94,84%	12,33%

Les matériaux antireflets aboutissant aux meilleurs rendements héliothermiques sont ZnO, SiO₂ et MgF₂. De manière générale, déposer plusieurs couches antireflets permet d'augmenter l'absorptance solaire (A_s). Néanmoins cette augmentation correspond aussi à une augmentation de l'émittance corps noir (E_{CN}). Le rendement héliothermique est encore une fois le critère

déterminant si l'ajout est bénéfique ou non. Pour 573 K, déposer deux ($C = 30$ à 120) voire trois ($C = 10$) couches antireflet permet d'augmenter le rendement héliothermique d'environ 1 à 2% par rapport à une monocouche. Une même observation peut être faite à 823 K pour les concentrations de 80 et 120, le gain de rendement étant cette fois inférieur à 1%. Aux températures plus élevées (823 K) et faibles concentrations ($C = 10, 30$), cas cependant peu réaliste car il est difficile d'atteindre cette température avec une concentration aussi basse, le passage d'une monocouche aux multicouches antireflet augmente l'émittance corps noir et donc les pertes thermiques radiatives, et il est alors préférable de n'utiliser qu'une seule couche antireflet.

Intérêt d'un antireflet poreux

Comme nous l'avons vu au chapitre V traitant de la fonction antireflet, les gradients d'indices nécessaires aux couches antireflets peuvent être obtenus en jouant sur la porosité des couches minces. Nous avons donc étudié l'intérêt d'antireflets poreux pour maximiser le rendement héliothermique de l'empilement spectralement sélectif W/W-Al₂O₃/CAR. Rarement mentionnées dans la bibliographie pour cette application d'absorption solaire, les couches minces poreuses permettent néanmoins d'accentuer le gradient d'indice de réfraction entre le cermet et le milieu ambiant et ainsi dans le principe d'augmenter l'absorptance solaire [198]. Comme au chapitre V, nous avons étudié le cas du SiO₂ poreux. Notons que sa compatibilité avec un usage à haute température est cette fois critique pour son utilisation sur un absorbeur thermique. Les aérogels de silice sont très résistants à la température (jusqu'à 600°C) [199] et le SiO₂ poreux peut être fabriqué à haute température par calcination ou par évaporation supercritique de solvant [158], [170]. Des couches de SiO₂ poreux peuvent donc être compatibles avec l'application visée.

La Table 26 donne le rendement héliothermique obtenu pour une structure W/W-Al₂O₃ sur laquelle sont superposées en surface une à trois couches antireflets de SiO₂ dense ou poreux (Figure 110). Les résultats sont comparés au cas d'une couche superficielle de SiO₂ dense. Les valeurs en vert correspondent aux meilleurs rendements calculés. L'absorptance solaire, l'émittance corps noir et les porosités respectives des couches (du cermet vers le milieu ambiant) pour les structures optimales correspondantes sont également données.

Table 26 : Rendement héliothermique d'empilements spectralement sélectifs W/W-Al₂O₃/CAR avec des antireflets SiO₂ compact ou poreux

C	T	SiO ₂ dense	SiO ₂ poreux	Double SiO ₂ poreux	Triple SiO ₂ poreux	A_s	E_{CN}	Porosité(s)
10	573 K	89,83%	89,96%	90,29%	90,16%	93,52%	4,13%	12%/82%
30	573 K	92,54%	92,38%	92,95%	93,06%	94,39%	5,54%	3%/73%/90%
80	573 K	93,64%	93,30%	94,07%	93,80%	94,77%	7,16%	2%/74%
120	573 K	93,89%	93,57%	94,16%	94,32%	94,05%	6,77%	5%/74%/84%
10	823 K	67,86%	69,26%	68,43%	65,76%	88,42%	5,45%	31%
30	823 K	81,82%	83,18%	83,12%	82,30%	90,96%	5,45%	28%
80	823 K	88,23%	88,60%	88,96%	88,77%	93,12%	9,47%	7%/79%
120	823 K	89,87%	90,01%	90,52%	90,36%	93,80%	11,21%	1%/74%

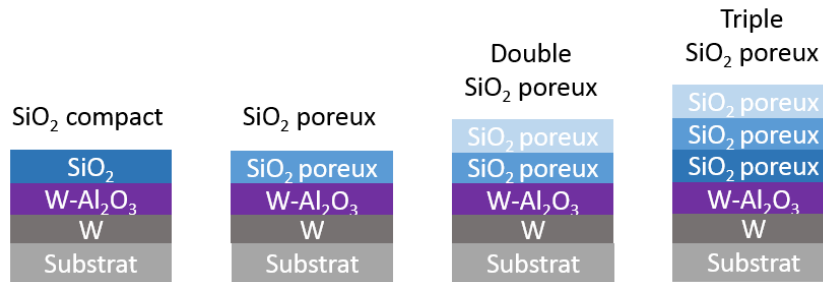


Figure 110 : Empilement spectralement sélectif W/W-Al₂O₃/CAR avec une à trois couches antireflet de SiO₂ dense ou poreux

Comme attendu, l'ajout d'antireflets SiO₂ poreux sur le multicouche sélectif donne de meilleurs rendements héliothermiques que pour le cas du SiO₂ dense. On note à nouveau qu'un nombre important de couches antireflet fait augmenter l'absorptance solaire (A_s) mais également l'émittance corps noir (E_{CN}), et que deux à trois couches sont plus efficaces à 573 K tandis qu'une à deux couches suffisent à 823 K. Dans le cas de plusieurs couches poreuses, la porosité optimale des couches antireflets augmente du cermet vers l'ambiant pour créer un gradient décroissant d'indice de réfraction. Nous observons que ce gradient est très marqué, avec des couches inférieures (côté cermet) très denses (< 12%) et des couches supérieures (côté air) très poreuses (> 74%). Par exemple, pour $C = 80$ et $T = 823$ K, la porosité des deux couches est de 7% puis 79%.

L'utilisation de couches antireflet poreuses peut donc être une solution pour garantir un rendement héliothermique élevé, mais les niveaux de porosité nécessaires, s'ils sont atteignables expérimentalement, peuvent être problématiques pour la tenue mécanique et en température des couches poreuses, à moins d'avoir recours à des méthodes d'élaboration spécifiques [158], [170] qui ne sont pas nécessairement compatibles avec les couches inférieures de l'empilement.

3.3. Sélection des structures de revêtements sélectifs

Les empilements spectralement sélectifs peuvent être constitués d'un nombre plus ou moins élevé de couches minces de nature diélectrique, métallique ou de type cermet (composite métal-diélectrique). Même si l'on fixe les matériaux de base utilisés pour l'empilement, il existe un grand nombre de possibilités pour la structure de celui-ci : absorbeur à gradient de cermets, alternance métal/diélectrique, alternance cermet/diélectrique, alternance métal/cermet, etc. A l'inverse du paragraphe 3.1 (p.204) où nous faisons varier les matériaux d'un empilement de structure fixe (métal/cermet/diélectrique antireflet), nous allons maintenant fixer les matériaux constitutifs de l'empilement (nous choisissons ici W, Al₂O₃ et cermet W-Al₂O₃) et faire varier la structure de l'empilement (nombre, ordre et nature des couches). Comme précédemment, notre algorithme d'optimisation est utilisé pour maximiser le rendement héliothermique de ces structures, en optimisant leurs épaisseurs et compositions. Notre but est d'établir une structure optimale pour chaque type d'empilement, dans le cas illustratif de matériaux à base W et Al₂O₃.

Gradient de cermets

Une structure à gradient de cermets est un empilement de plusieurs couches minces constitué de composites métal-diélectrique présentant des taux d'inclusion (fractions volumiques) et des épaisseurs variables. Pour obtenir des rendements héliothermiques élevés, il est nécessaire de rajouter une base réflectrice et une couche superficielle antireflet. Intéressons-nous au cas W/multicouche à gradient W- Al_2O_3 /antireflet (CAR) Al_2O_3 . La Figure 111 illustre les empilements étudiés, où le nombre de couches W- Al_2O_3 varie. La Table 27 présente les résultats de rendement héliothermique maximisé par notre algorithme. Les valeurs en vert correspondent aux meilleurs rendements héliothermiques obtenus pour différents taux de concentration et températures d'absorbeur.

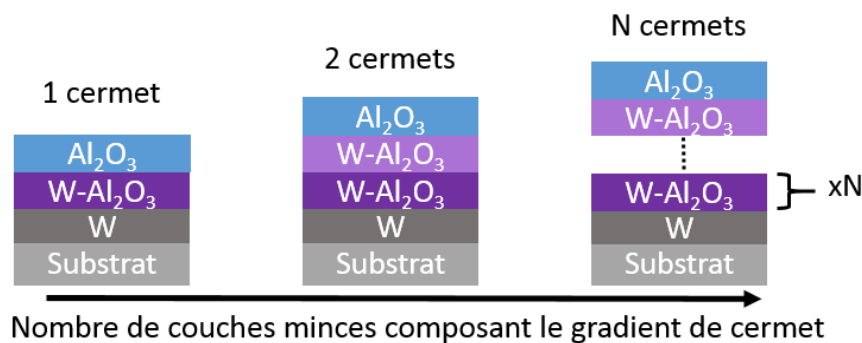


Figure 111 : Revêtements sélectifs à gradient de cermet W- Al_2O_3 sur W avec CAR Al_2O_3

Table 27 : Rendement héliothermique des revêtements à gradient de cermets W- Al_2O_3 sur base de W avec couche antireflet Al_2O_3 , en fonction de la température et du taux de concentration

C	T	1 cermet	2 cermets	3 cermets	4 cermets	5 cermets	6 cermets
10	573 K	89,83%	90,98%	90,98%	90,95%	90,92%	90,75%
30	573 K	92,54%	94,19%	94,17%	94,17%	94,16%	94,17%
80	573 K	93,64%	95,42%	95,43%	95,42%	95,42%	95,42%
120	573 K	93,89%	95,71%	95,74%	95,73%	95,72%	95,72%
10	823 K	67,86%	69,29%	67,43%	66,25%	68,83%	69,00%
30	823 K	81,82%	83,22%	83,25%	83,00%	82,69%	83,07%
80	823 K	88,23%	89,60%	89,48%	89,55%	89,57%	89,55%
120	823 K	89,87%	91,33%	91,33%	91,30%	91,31%	91,25%

Nous observons que les meilleurs rendements héliothermiques sont obtenus pour deux ou trois couches minces de cermet. L'ajout de couches supplémentaires (4 à 6) n'apporte rien au rendement héliothermique de ces structures, et a même tendance à le dégrader légèrement.

Un exemple des épaisseurs et fractions volumiques optimisées pour un triple cermet est montré sur la Figure 116 (p.215) ($C = 80$, $T = 573$ K). Comme attendu, les fractions volumiques (taux d'inclusions métalliques) des cermets sont nécessairement plus faibles au sommet de l'empilement (proches de l'antireflet) qu'à sa base [89], afin d'obtenir un gradient d'indice de réfraction décroissant de W vers Al_2O_3 . Nous retrouvons cette conclusion dans la bibliographie [89], où les doubles cermets sont récurrents dans les solutions industrialisées.

Alternance métal/diélectrique

Nous avons ensuite étudié des empilements multicouches n'utilisant pas de cermets, mais des superpositions d'une ou plusieurs bicouches métal/diélectrique W/Al₂O₃ (Figure 112). Lorsqu'elle termine l'empilement, la couche diélectrique joue également le rôle d'antireflet superficiel. Nous cherchons à maximiser le rendement héliothermique de telles solutions multicouches en optimisant les épaisseurs à l'aide de notre algorithme. La Table 28 montre les rendements héliothermiques correspondant aux diverses structures simulées, jusqu'à 5 bicouches W/Al₂O₃, pour divers couples température/concentration. Les valeurs en vert indiquent les meilleurs rendements obtenus.

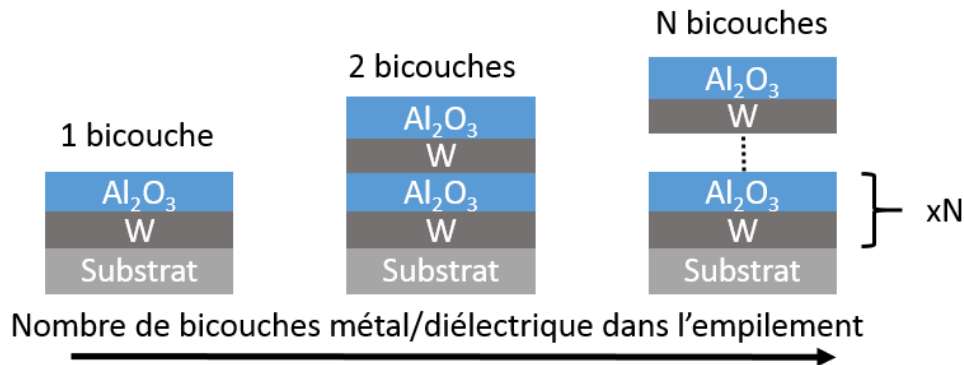


Figure 112 : Empilement sélectif utilisant une alternance de bicouches W/Al₂O₃

Table 28 : Rendement héliothermique d'empilements spectralement sélectifs utilisant une alternance de bicouches W/Al₂O₃, pour différents couples concentration/température

C	T	1 bicouche	2 bicouches	3 bicouches	4 bicouches	5 bicouches
10	573 K	66,81%	86,06%	87,99%	88,31%	88,25%
30	573 K	68,59%	88,46%	91,37%	92,28%	92,56%
80	573 K	69,41%	89,22%	92,47%	93,62%	94,02%
120	573 K	69,54%	89,37%	92,69%	93,85%	94,46%
10	823 K	55,20%	67,67%	67,53%	59,78%	58,85%
30	823 K	63,77%	81,76%	82,28%	81,62%	81,32%
80	823 K	67,20%	86,63%	88,69%	89,04%	88,95%
120	823 K	68,05%	87,63%	90,13%	90,74%	90,77%

Nous constatons que l'augmentation du nombre de bicouches métal/diélectrique permet d'augmenter le rendement héliothermique, en augmentant l'absorptance solaire (calcul non présenté ici) bien que le nombre plus élevé de couches augmente également l'émittance corps noir. La Figure 113 illustre cet effet par la réflectance spectrale $R(\lambda)$ calculée pour un à quatre bicouches W/Al₂O₃. On visualise clairement qu'en augmentant le nombre de bicouches, $R(\lambda)$ diminue sur toute la gamme spectrale, menant à l'augmentation de A_s et E_{CN} . Pour les couples (C, T) faibles ou (C, T) élevés, le nombre de bicouches optimal est élevé (4 ou 5, Table 28), de sorte que A_s et par suite le rendement héliothermique augmentent, et ce malgré une augmentation de E_{CN} dont l'impact est limité soit par une température faible (faibles pertes thermiques), soit par une concentration élevée qui augmente d'autant la part de flux absorbé (équation (VI-1)). A l'inverse, nous observons un faible nombre optimal de couches minces

(deux à trois) pour des concentrations faibles couplées à des températures d'absorbeur élevées, afin de limiter E_{CN} et le flux émis. Ainsi il existe un nombre de bicouches idéal en fonction des conditions opératoires de température et de concentration.

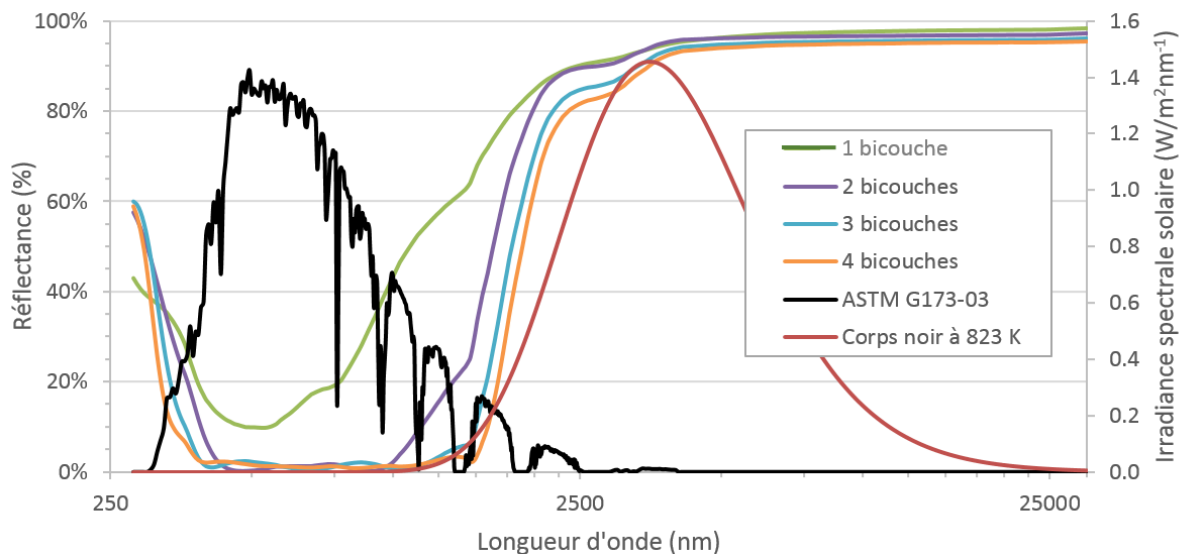


Figure 113 : Réflectance spectrale en fonction du nombre de bicouches W/Al_2O_3 pour $C = 80$ et $T = 823 K$

L'augmentation de l'absorptance solaire et du rendement héliothermique avec le nombre de bicouches s'atténue néanmoins aux forts nombres de bicouches (Figure 113). Ceci est dû à l'atténuation progressive du rayonnement dans l'épaisseur de l'empilement. En effet, pour un nombre élevé de bicouches (supérieur à 5), le calcul de transmittance de l'empilement de couches minces (non présenté ici) montre que le rayonnement n'est transmis que dans les quatre à cinq premières bicouches, majoritairement dû à l'absorptance des couches minces de tungstène. De plus, les épaisseurs optimales de chaque bicouche diminuent au fur et à mesure que le nombre d'alternances augmente : dans l'empilement à cinq périodes, la couche de tungstène du bicouche situé au sommet de l'empilement a une épaisseur optimale faible, proche de 5 nm. Cette épaisseur très faible est nécessaire pour que le rayonnement soit transmis aux bicouches situés en dessous. Ce type d'empilement est modélisable mais difficile à réaliser. Ainsi, des solutions à fort nombre d'alternances ne sont plus pertinentes techniquement et optiquement. A titre d'illustration, les épaisseurs optimales d'un empilement de quatre bicouches W/Al_2O_3 est présenté sur la Figure 116 (p.215) ($C = 80$, $T = 573 K$).

Alternance cermet/diélectrique

Le cas précédent nécessite de déposer de fines couches (5-10 nm) de métal entre chaque couche mince de diélectrique. Cette étape peut être source de difficulté : il est nécessaire de très bien contrôler les procédés de dépôt. De plus les indices optiques de très fines couches peuvent être différents de ceux du même matériau massif [103]. Analysons maintenant le cas où le métal W est remplacé par un cermet $W-Al_2O_3$, dans des alternances $W-Al_2O_3/Al_2O_3$. La dernière couche Al_2O_3 joue également le rôle d'antireflet. Les empilements sont illustrés par la Figure

114, et les rendements héliothermiques des solutions optimales sont présentés dans la Table 29 pour différents couples concentration/température.

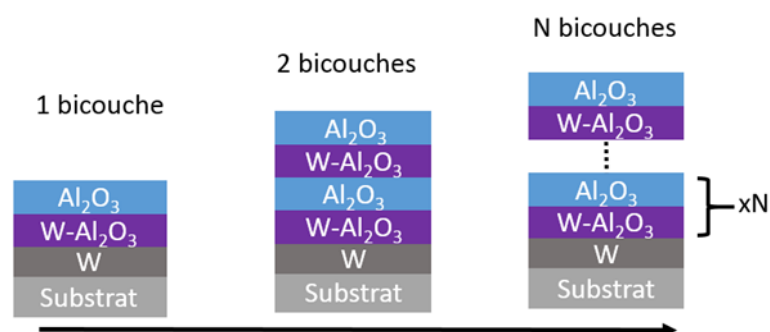


Figure 114 : Empilements sélectifs utilisant des alternances de bicouches $W-Al_2O_3/Al_2O_3$

Table 29 : Rendement héliothermique d'empilements spectralement sélectifs utilisant des alternances $W-Al_2O_3/Al_2O_3$

C	T	1 bicouche	2 bicouches	3 bicouches	4 bicouches
10	573 K	85,19 %	89,41 %	89,49 %	88,53 %
30	573 K	89,32 %	93,02 %	93,46 %	93,21 %
80	573 K	92,15 %	94,98 %	95,07 %	94,93 %
120	573 K	92,92 %	95,19 %	95,40 %	95,57 %
10	823 K	61,28 %	68,33 %	65,37 %	61,63 %
30	823 K	77,77 %	82,67 %	82,63 %	82,62 %
80	823 K	85,02 %	89,00 %	88,92 %	88,42 %
120	823 K	86,90 %	90,53 %	90,47 %	89,02 %

Comme précédemment, le meilleur rendement héliothermique n'est pas obtenu pour un nombre fixe de bicouches. Il est nécessaire d'adapter le nombre de bicouches en fonction du couple concentration/température. Cela est dû à l'augmentation de l'absorptance solaire simultanément à l'émittance corps noir. Pour une température d'absorbeur de 573 K, les pertes thermiques sont faibles. Il est donc préférable d'augmenter l'absorptance solaire en déposant de trois à quatre bicouches, ce qui entraîne des rendements héliothermiques supérieurs à 95% pour les taux de concentration les plus élevés (Table 29). Pour une température d'absorbeur élevée (823 K) un nombre plus réduit de bicouches (typiquement 2) permet un bon équilibre entre absorptance solaire et émittance corps noir. Un exemple des épaisseurs et fractions volumiques en métal des cermets optimisées pour un empilement triple cermet/diélectrique $W-Al_2O_3/Al_2O_3$ est montré sur la Figure 116 (p.215) ($C = 80$, $T = 573$ K).

Alternance métal/cermet

Enfin, étudions le cas où le diélectrique est remplacé par le métal, dans des alternances métal/cermet $W/W-Al_2O_3$. L'empilement est protégé par une couche antireflet superficielle Al_2O_3 . La Figure 115 illustre les empilements étudiés et la Table 30 rassemble les rendements héliothermiques issus de l'optimisation. Les valeurs en vert soulignent les rendements les plus élevés. Celles en orange (trois alternances) correspondent à des solutions peu réalistes, car la dernière couche de métal est extrêmement mince, avec des épaisseurs comprises entre 1 et 5 nm. Les indices de réfraction de couches aussi fines pourraient donc être différents de ceux

d'une couche mince plus épaisse, invalidant ainsi les résultats modélisés dans ce cas. Pour cette raison, des empilements de plus de trois bicouches ne sont pas montrés.

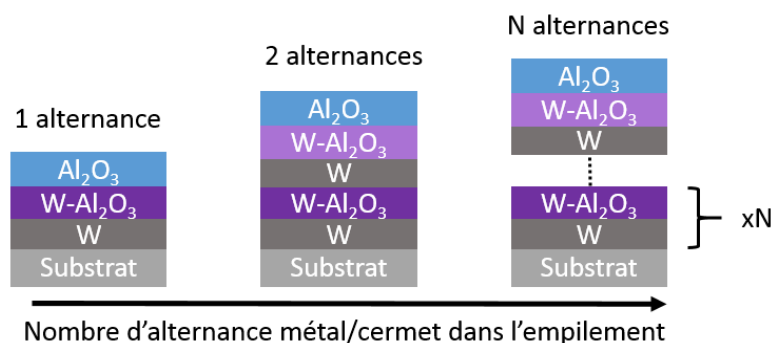


Figure 115 : Empilements spectralement sélectifs utilisant des alternances W/W-Al₂O₃ avec couche antireflet Al₂O₃

Table 30 : Rendement héliothermique d'alternances W/W-Al₂O₃ avec couche antireflet Al₂O₃

C	T (K)	1 bicouche	2 bicouches	3 bicouches
10	573	89,83%	92,07%	91,66%
30	573	92,54%	95,18%	95,17%
80	573	93,64%	96,50%	96,73%
120	573	93,89%	96,74%	97,00%
10	823	67,86%	69,80%	68,32%
30	823	81,82%	84,62%	84,23%
80	823	88,23%	91,13%	90,33%
120	823	89,87%	92,84%	92,63%

De manière générale, les rendements héliothermiques obtenus sont plus élevés que dans les cas précédents. Ceci est dû à des absorptances solaires élevées couplées à des émittances corps noir modérées, comme l'illustre la Table 31. Dans cette dernière, le code couleur correspond à celui de la Table 30, les valeurs en vert correspondant aux meilleurs rendements. Comme précédemment, un nombre croissant de bicouches fait augmenter A_s et E_{CN} . On peut voir à nouveau que les absorptances solaires les plus élevées ne donnent pas forcément lieu aux rendements les plus élevés, car un compromis avec une faible émittance doit être trouvé. Un exemple des épaisseurs de couches et fractions volumiques en métal des cermets optimaux pour un empilement triple métal/cermet W/W-Al₂O₃ est visible sur la Figure 116 (p.215) ($C = 80$, $T = 573$ K).

Table 31 : Absorptance solaire et émittance corps noir d'empilements sélectifs W/W-Al₂O₃

C	T (K)	Absorptance solaire A_s			Emittance Corps Noir $E_{CN}(T)$		
		1 bicouche	2 bicouches	3 bicouches	1 bicouche	2 bicouches	3 bicouches
10	573	93,47%	96,44%	96,92%	4,04%	4,85%	5,84%
30	573	94,13%	96,94%	97,17%	5,31%	5,85%	6,67%
80	573	94,38%	97,30%	97,56%	6,57%	7,09%	7,40%
120	573	94,42%	97,32%	97,60%	7,01%	7,72%	7,95%
10	823	85,23%	89,37%	89,54%	4,28%	4,83%	5,23%

30	823	90,70%	93,42%	93,65%	6,57%	6,52%	6,97%
80	823	92,86%	95,96%	95,52%	9,13%	9,52%	10,25%
120	823	93,40%	96,48%	96,82%	10,44%	10,78%	12,38%

Bilan

A l'issue de cette étude sur les structures optimales d'empilements sélectifs à base de W et Al_2O_3 , nous pouvons tirer plusieurs conclusions.

1. Le nombre de couches minces d'un empilement spectralement sélectif doit être adapté en fonction des conditions opératoires (concentration et température). Nous observons le plus souvent qu'un empilement comprenant entre quatre et six couches, soit deux à trois alternances de bicouches, permet d'obtenir des performances élevées.
2. Plusieurs empilements mènent à des rendements héliothermiques très élevés, par exemple supérieurs à 95% pour des conditions opératoires favorables ($C = 80$ ou 120 , $T = 573$ K). Les possibilités d'empilements performants sont donc grandes.
3. Finalement, nous pouvons classer les quatre types d'empilements étudiés (gradient de cermets et alternances métal/diélectrique, cermet/diélectrique et métal/cermet) par ordre de performance. Une comparaison de ces structures est présentée sur la Figure 116 pour $C = 80$ et $T = 573$ K, montrant les épaisseurs de couches et fractions volumiques (VF) en métal des cermets optimales. Indépendamment des conditions opératoires, le cas le plus performant est une alternance métal/cermet, avec de très fines couches métalliques, surmontée d'une couche antireflet (Figure 115, p.213). Les gradients de cermets (Figure 111, p.209) et les alternances cermet/diélectrique (Figure 113, p.211) arrivent en seconde et troisième places. L'usage de cermets est en effet avantageux : la nature du matériau élaboré peut être variée entre métallique (VF élevée) et diélectrique (VF faible ou nulle), afin d'adapter précisément l'indice de réfraction complexe des couches minces pour obtenir le comportement optique désiré. La fabrication de cermets de composition finement contrôlée pouvant s'avérer difficile, une alternance métal/diélectrique (Figure 114, p.212) peut être une alternative de fabrication présentant des performances acceptables. Bien que nous n'ayons traité que le cas des matériaux à base W et Al_2O_3 , nous pouvons raisonnablement penser que cet ordre de performance est aussi valable pour d'autres associations métal/diélectrique.

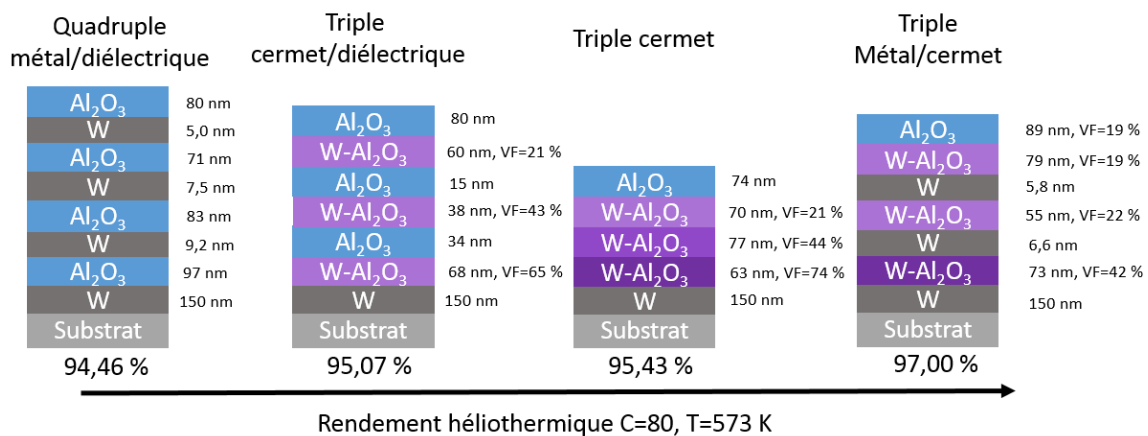


Figure 116 : Différents traitements sélectifs classés selon leurs rendements héliothermiques pour $C = 80$ et $T = 573 K$

3.4. Conclusions sur la sélection des matériaux et structures de revêtements sélectifs

Les catégories de matériaux pertinents pour les revêtements spectralement sélectifs (forte absorption solaire, faible émittance infrarouge) ont été identifiées précédemment, par une étude bibliographique et théorique (§2.2, p.194), comme étant des métaux (réflecteurs infrarouge), des diélectriques (transparents antireflet) et des composites métal-diélectrique ou cermets (absorbeurs solaires). L'étude menée dans ce paragraphe, qui considère de nombreuses associations de matériaux métalliques et diélectriques (sous forme d'empilements tricouches métal/cermet/diélectrique, §3.1 p.204), nous a permis d'établir qu'il n'existe cependant pas de matériaux universels maximisant les performances des revêtements sélectifs. Il s'avère en effet que selon les conditions opératoires considérées (taux de concentration C et température de l'absorbeur T , qui influent fortement sur le rendement héliothermique et les propriétés optimales associées, §2.4 p.199), ce sont des associations de matériaux différentes qui donnent lieu aux meilleures performances solaires. Les matériaux constitutifs du revêtement sélectif doivent donc être sélectionnés en fonction des conditions d'utilisation prévues pour l'absorbeur thermique sur lequel le revêtement sera déposé.

Concernant la structure du revêtement (étudiée dans le cas de matériaux à base W et Al₂O₃, §3.3 p.208), il semble que quel que soit le type de matériaux utilisés, des empilements de quatre à six couches soient les plus performants. Ils représentent un compromis optimal entre une absorptance solaire élevée et une émittance corps noir modérée. Au sein de telles structures, l'utilisation de cermets mène aux meilleures performances, avec par exemple un rendement héliothermique de 95 à 97% pour $C = 80$ et $T = 300^{\circ}C$ (Figure 116, p.215). En particulier, des alternances métal/cermet où les couches métalliques intermédiaires sont fines (5 à 10 nm) sont à privilégier. Des empilements à gradients de cermets, constitués de plusieurs cermets de fraction volumique en métal décroissante du substrat vers l'ambient, sont également une solution performante, de même que des alternances cermet/diélectrique. Les cermets peuvent cependant être délicats à fabriquer avec des niveaux de précision élevés sur leur composition. Ainsi, des empilements multicouches alternant métal et diélectrique, plus simples à maîtriser

expérimentalement, peuvent être une autre solution, certes légèrement moins performante (1 ou 2% de rendement en moins), mais largement satisfaisante.

Enfin, par souci de simplification de l'optimisation, nous avons majoritairement considéré des antireflets monocouches. Nous avons cependant remarqué, en nous inspirant des études menées au chapitre V, qu'il était possible d'améliorer encore les performances solaires des revêtements sélectifs en utilisant des antireflets multicouches (§3.2, p.206). En particulier, des bicouches $\text{SiO}_2/\text{MgF}_2$ ou SiO_2 poreux, compatibles avec les applications à haute température, pourraient améliorer les rendements héliothermiques d'environ 0,5 à 2% selon les couples concentration/température et les autres matériaux utilisés dans l'empilement.

Ainsi, il existe a priori une marge d'amélioration non négligeable pour les revêtements sélectifs, en particulier si ceux-ci sont adaptés aux conditions spécifiques d'utilisation dans les collecteurs solaires. Ceci explique sans doute la bibliographie récente prolifique sur le sujet.

IV. Effets additionnels : vers les absorbeurs et collecteurs solaires réels

Le but de ce chapitre est non seulement de proposer, grâce à la modélisation, des solutions performantes de couches minces pour absorbeurs sélectifs, mais également de s'assurer que ces solutions soient réalistes et applicables. Dans ce paragraphe, nous prendrons donc en compte plusieurs phénomènes permettant de se rapprocher de matériaux et empilements réels (rugosité de surface, incertitude sur l'épaisseur et la nature des matériaux déposés). Nous nous interrogerons également sur l'optimisation des empilements sélectifs en tenant compte de l'angle d'incidence du rayonnement et de la modification du spectre solaire dans un collecteur complet, notamment par les réflexions et transmissions des surfaces en amont de l'absorbeur thermique.

4.1. Effets de la rugosité et de l'incertitude sur l'épaisseur et la composition des matériaux déposés

Nous allons tout d'abord étudier l'effet sur les performances solaires de la rugosité de surface et entre les couches minces, ainsi que des incertitudes sur l'épaisseur et la nature des matériaux déposés (composition des cermet). Nous avons choisi d'illustrer ces effets avec trois empilements différents parmi ceux étudiés dans le paragraphe précédent : alternances métal/diélectrique, double cermet à gradient de composition, et alternances métal/cermet.

Influence de la rugosité

Comme précédemment (chapitres IV et V), la rugosité est considérée comme un mélange entre deux couches et modélisée par EMA (§5.4, p.58) et son influence est testée selon la méthode exposée dans le chapitre II (§3.3.2, p.83). Les méthodes de dépôt sous vide de couches minces permettent d'obtenir des rugosités de surface relativement faibles. Par exemple, une

thèse réalisée au laboratoire PROMES sur l'élaboration de SiCH (dépôt par PACVD) et W (dépôt par PVD) montre des rugosités de surface maximales de 10 nm [103]. Nous avons donc choisi ces ordres de grandeur de rugosité pour cette étude. La Figure 117 illustre les trois empilements sélectifs étudiés et y situe les différentes rugosités considérées (couches représentées par les lettres « a » à « f »).

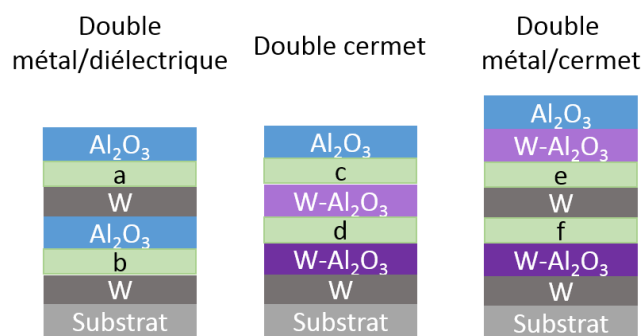


Figure 117 : Rugosités observables dans différents empilements spectralement sélectifs

Etudions l'impact de la rugosité entre deux couches minces d'un empilement spectralement sélectif sur le rendement héliothermique (rH). Certains des résultats obtenus sont présentés dans la Table 32, pour $C = 80$ et $T = 823$ K.

Table 32 : Impact des rugosités de 0 à 10 nm sur le rendement héliothermique de différents empilements spectralement sélectifs ($C = 80$ et $T = 823$ K)

	Rugosité	rH sans rugosité	rH avec rugosité	Perte ΔrH	Impact de la rugosité
a	Métal/Diélectrique (surface)	86,6 %	85,9 %	-0,7 %	Moyen
b	Métal/Diélectrique (profondeur)	86,6 %	86,6 %	-0,0 %	Nul
c	Cermet/Diélectrique	89,6 %	89,5 %	-0,1 %	Faible
d	Cermet/Cermet	89,6 %	89,0 %	-0,6 %	Moyen
e	Métal/Cermet (surface)	91,1 %	90,8 %	-0,3 %	Faible
f	Métal/Cermet de (profondeur)	91,1 %	90,8 %	-0,3 %	Faible

Nous observons que contrairement au cas des miroirs (chapitre IV, §4.2 p.134), l'impact sur le rendement héliothermique des rugosités intercouches (jusqu'à 10 nm) dans les empilements sélectifs est, sinon négligeable, relativement modéré (pertes de rendement inférieures à 1%). Les empilements réels, dont les couches peuvent être très légèrement rugueuses, devraient donc présenter peu ou prou les propriétés prédites par la modélisation.

Tolérance sur les incertitudes d'épaisseur et de composition des matériaux

La mise en oeuvre de procédés d'élaboration de couches minces (PVD, PACVD, etc.) peut engendrer des incertitudes d'épaisseur des films et de fraction volumique (composition) des cermets, souvent au travers d'imprécisions sur les durées de dépôt [194], [200]. Nous allons donc prendre en compte cet aspect par modélisation dans le cas des revêtements sélectifs, selon la méthode détaillée dans le chapitre II (3.3.2, p.83).

Nous présentons ici les résultats obtenus pour deux types de structures d'empilements étudiées précédemment (§3.3 p.208) : une double alternance métal/diélectrique W/Al₂O₃ (Figure 112, p.210, milieu) et un double gradient de cermets W-Al₂O₃ (Figure 111, p.209, milieu). Les résultats correspondant à deux autres types d'empilements sont également présentés en annexe (§6.3, p.300).

Pour nos calculs, le critère d'arrêt de l'algorithme d'optimisation (voir chapitre II, §3.2.1 p. 77) est fixé à 10^{-5} , ce qui signifie que le rendement héliothermique est optimisé à 0,001% près. Lorsque l'incertitude sur le rendement est inférieure à 10^{-5} , le programme considère le problème résolu, stoppe le processus de sélection et donne l'ensemble admissible des variables optimales de l'empilement (épaisseurs et fractions volumiques), ce qui permet de déterminer l'incertitude et donc la tolérance sur chacune d'elles. Les incertitudes sont représentées par l'écart-type sur l'ensemble admissible de chaque variable. Notons que la rapidité de convergence (donc le nombre d'itérations nécessaires) lors de l'optimisation d'une variable donne une idée précise de la sensibilité du rendement héliothermique à cette variable : une variable qui mène à une convergence rapide a un fort impact, et inversement.

Dans les sous-paragrophes suivants, les graphiques présentent sur deux axes différents, à gauche l'incertitude sur les variables (en nm pour les épaisseurs respectives des couches dans l'empilement, ou en pourcentage pour les fractions volumiques des cermets), à droite l'incertitude sur le rendement héliothermique, en fonction du nombre d'itérations nécessaires à la convergence.

Empilement à double alternance métal/diélectrique W/Al₂O₃

La Figure 118 illustre les résultats obtenus pour un empilement spectralement sélectif constitué d'une double alternance métal/diélectrique W/Al₂O₃ (Figure 112, p.210, milieu) pour $C = 80$ et $T = 823$ K. Les résultats montrent que la couche de métal intermédiaire (au milieu de l'empilement, couche n°3) est la plus importante. Son épaisseur doit être parfaitement contrôlée pour s'assurer que le rendement héliothermique sera celui attendu par la modélisation. En d'autres termes, le rendement est très sensible à la variable « épaisseur de la couche W (n°3) ». Elle est en effet la première courbe (en vert) à converger (son incertitude diminue le plus rapidement avec le nombre d'itérations). L'épaisseur de la couche antireflet Al₂O₃ au sommet de l'empilement est la deuxième variable la plus sensible (couche n°4 en violet), puis vient la couche diélectrique Al₂O₃ intermédiaire (couche n°2 en rouge). La précision d'épaisseur sur la couche de métal au-dessus du substrat (couche n°1 en bleu) a le moins d'importance, et peut varier de plusieurs nanomètres sans impacter le rendement héliothermique, à 0,001% (10^{-5}) près.

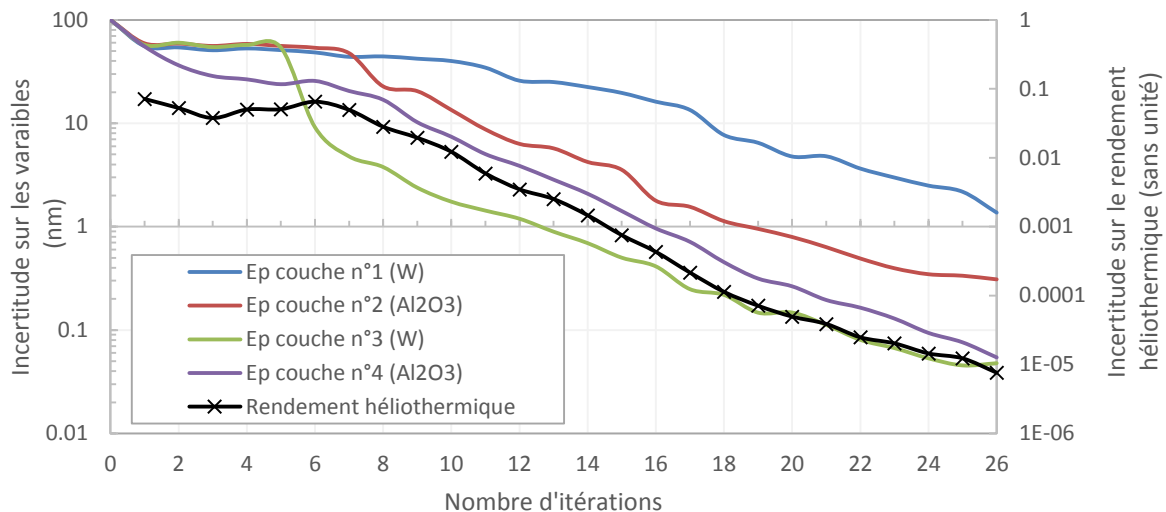


Figure 118 : Convergence de l'optimisation des variables d'un empilement spectralement sélectif multicouche métal/diélectrique W/Al₂O₃

Empilement à double cermet W/Al₂O₃

La Figure 119 illustre le cas d'un empilement spectralement sélectif composé d'une couche W, de deux cermets W/Al₂O₃ et d'une couche antireflet Al₂O₃ (Figure 111, p.209, milieu) pour $C = 80$ et $T = 823$ K. Les paramètres clefs sont cette fois les fractions volumiques (VF) des deux cermets (couches n°2 et 3) qui doivent être bien contrôlées (les courbes orange et bleue convergent le plus rapidement). Toutes les épaisseurs (cermet et antireflet) sont d'égale importance et ne peuvent varier que d'une épaisseur inférieure au nanomètre, sauf la couche de métal au-dessus du substrat (couche n°1, en bleu) qui peut varier quant à elle d'une dizaine de nanomètres. Nous observons des résultats similaires avec des doubles alternances cermet/diélectrique W-Al₂O₃/Al₂O₃ et métal/cermet W/W-Al₂O₃ (voir annexe §6.3, p.300).

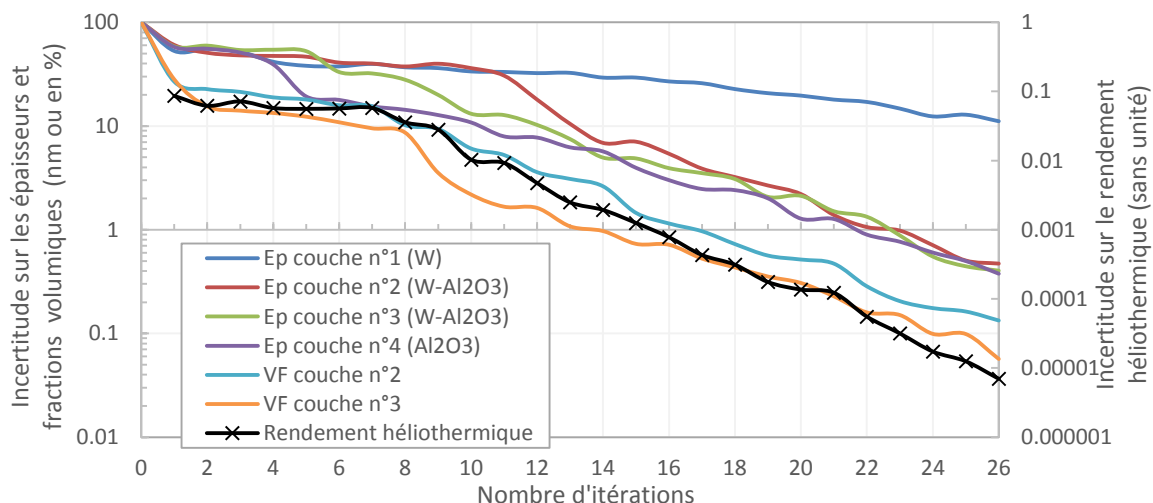


Figure 119 : Convergence d'optimisation des variables d'un empilement spectralement sélectif de type double cermet W/Al₂O₃

Bilan

En conclusion, l'épaisseur de la première couche métallique d'un empilement spectralement sélectif a peu d'importance, tant qu'elle permet de masquer le substrat. Par contre, l'épaisseur d'une couche métallique au milieu de l'empilement, en particulier dans le cas d'alternances métal/diélectrique, doit être parfaitement contrôlée (au nm près). De même, la composition des cermet a un impact sur le rendement. Nous remarquons qu'il est préférable de contrôler précisément la fraction volumique plutôt que l'épaisseur des cermet. De manière générale, une précision sur les variables sensibles de l'ordre du nanomètre ou du % permet un contrôle du rendement héliothermique à 0,1% près, ce qui reste très raisonnable pour leur réalisation expérimentale.

4.2. Effet de l'angle d'incidence du flux solaire

Dans un collecteur solaire à concentration, l'angle d'incidence des rayons du soleil sur l'absorbeur thermique est rarement normal. En effet, le dispositif à concentration oblige le rayonnement à passer par la focale, et donc à atteindre le récepteur avec un certain angle d'incidence θ non nul. De nombreuses technologies intègrent des récepteurs cylindriques (tubes absorbeurs des récepteurs cylindro-paraboliques et Réflecteurs Linéaires Fresnel) ou à cavité (centrales à tour, concentrateurs paraboliques). Nous avons donc étudié l'impact de l'angle d'incidence sur les performances de trois empilements spectralement sélectifs représentatifs (Figure 120). Les structures multicouches présentées (optimisées à $\theta = 0^\circ$ pour $C = 80$, $T = 823$ K) sont classées de gauche à droite selon leur rendement héliothermique croissant, les solutions multicouches de type double métal/cermet étant les plus performantes.

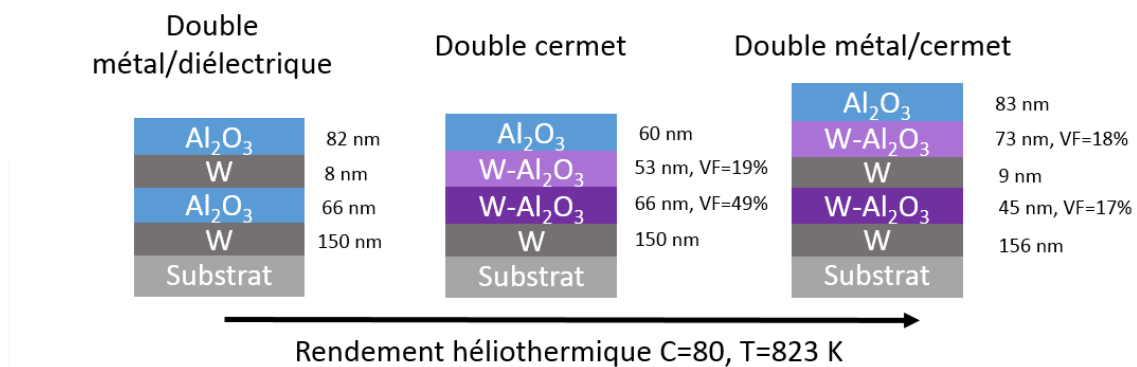


Figure 120 : Trois types d'empilements spectralement sélectifs, classés en fonction de leur rendement héliothermique à $C = 80$, $T = 823$ K

La Figure 121 illustre l'évolution des propriétés optiques du double cermet optimisé à $\theta = 0^\circ$, représentatives de celles des deux autres empilements, pour un angle d'incidence variant de 0 à 75° . Nous observons que lorsque l'angle d'incidence augmente, l'absorptance solaire diminue alors que l'émissance corps noir augmente. Ces variations conduisent à une réduction du rendement héliothermique, qui décroît fortement au-delà d'une incidence de 35° .

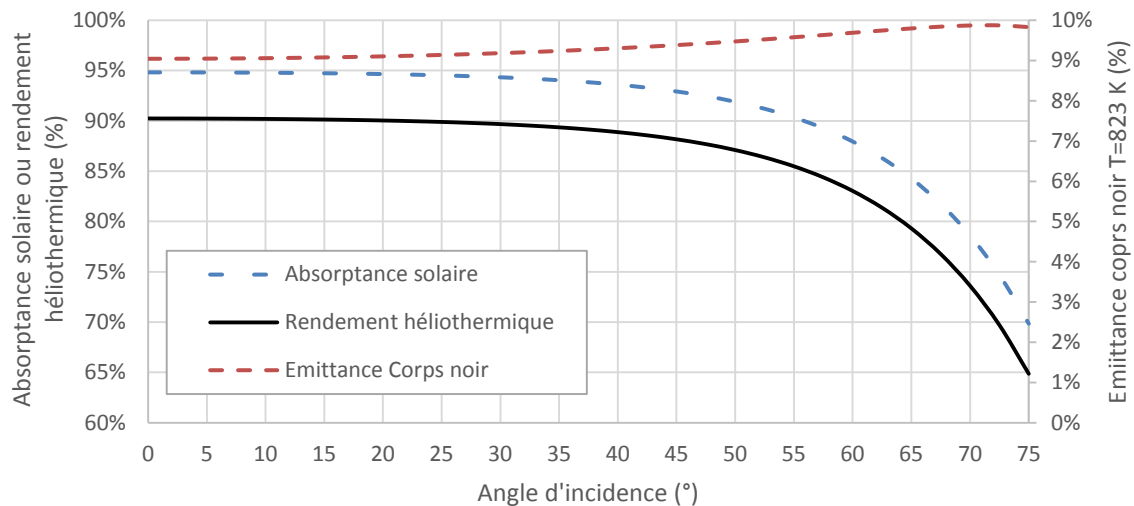


Figure 121 : Propriétés optiques d'un empilement spectralement sélectif de type double cermet en fonction de l'angle d'incidence

Cette réduction du rendement héliothermique est similaire pour les différents types d'empilement spectralement sélectifs (Figure 122). Quelle que soit la technologie de revêtement choisie, au-delà de 60°, la diminution du rendement héliothermique est drastique. Cette perte s'explique par une augmentation de la réflectance spectrale dans le visible et sa diminution dans l'infrarouge (Figure 123). En effet, à des angles d'incidence élevés, des pics d'absorption apparaissent dans l'IR, en particulier un pic à 11 μm dû à la vibration Al-O du Al_2O_3 , utilisé dans l'empilement spectralement sélectif comme antireflet et dans le cermet (Figure 120). Cet effet est connu sous le nom d'effet Berreman [201], [202].

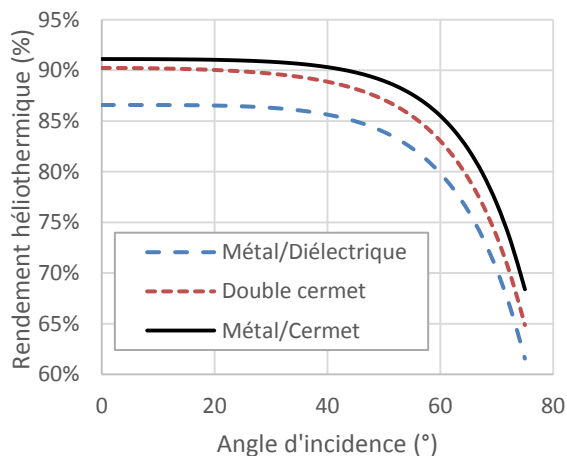


Figure 122 : Rendements héliothermiques en fonction de l'angle d'incidence

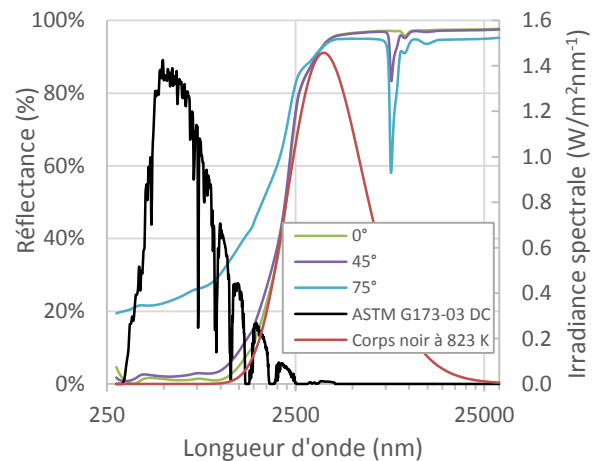


Figure 123 : Réflectance d'un double cermet pour différents angles d'incidence (°)

Dans les collecteurs solaires, la majorité du rayonnement solaire est incident sur l'absorbeur thermique avec un angle inférieur à 40°. Au vu de nos résultats, l'impact sur le rendement héliothermique de la variabilité de l'angle d'incidence devrait donc être limité.

4.3. Effet des surfaces collectrices en amont du revêtement sélectif

Les absorbeurs thermiques sont les derniers éléments rencontrés par le rayonnement dans un collecteur solaire. Ils sont éclairés par un flux solaire altéré spectralement par les surfaces situées en amont (miroirs, verres, etc.). Le nombre de configurations possibles est bien sûr très grand du fait des nombreuses technologies existantes (simple ou double réflexion, protection en verre ou non, avec antireflet ou non). A titre illustratif concernant cet effet d'altération du spectre solaire en amont, nous avons choisi les cas de réflexions sur un ou deux miroirs en argent et sur un miroir 3M® PV/CSP, de transmission à travers un verre protecteur BK7® muni d'un antireflet SiO₂ poreux, et d'une réflexion sur un miroir d'argent suivie de la transmission à travers un verre BK7® avec antireflet SiO₂ poreux.

Nous étudions le rendement héliothermique d'un empilement spectralement sélectif W/W-Al₂O₃/Al₂O₃ recevant un spectre solaire de référence altéré par ces différentes surfaces. La Table 33 illustre le gain de rendement héliothermique obtenu entre une optimisation des épaisseurs et fractions volumiques de l'empilement faite en tenant compte du spectre solaire altéré par les surfaces en amont dans les cinq cas évoqués ci-dessus, et une optimisation faite avec le spectre solaire de référence, sans altération, pour diverses conditions de concentration et de température. Les gains de rendement supérieurs à 1% sont notés en vert, ceux compris entre 0,5 et 1% en orange, ceux inférieurs à 0,5% en noir.

On observe, hormis pour le miroir 3M® PV/CSP, des gains de rendement inférieurs à 0,5% (en noir) pour la grande majorité des couples concentration/température, dû à une augmentation de l'absorptance solaire. Dans ces cas-là, il n'est donc pas primordial d'adapter spécifiquement les épaisseurs et fractions volumiques de l'empilement au spectre modifié. Pour $C = 10$ et $T = 300^{\circ}\text{C}$, cela peut s'avérer plus intéressant, avec des gains d'environ 1%. Cela devient absolument nécessaire pour une réflexion sur le miroir 3M® PV/CSP.

Table 33 : Gain de rendement héliothermique d'une surface W/W-Al₂O₃/Al₂O₃ en tenant compte de l'altération du spectre solaire par différentes surfaces

C	T (K)	Miroir Ag	Double miroir Ag	3M® PV/CSP	BK7® avec SiO ₂ poreux	Miroir Ag et BK7® avec SiO ₂ poreux
10	573	1,16%	1,17%	3,23%	1,12%	1,13%
30	573	0,64%	0,65%	1,60%	0,59%	0,59%
80	573	0,32%	0,33%	0,84%	0,29%	0,29%
120	573	0,21%	0,22%	0,67%	0,19%	0,20%
10	823	0,35%	0,35%	12,77%	0,78%	0,41%
30	823	0,23%	0,23%	6,74%	0,25%	0,25%
80	823	0,23%	0,23%	4,47%	0,26%	0,26%
120	823	0,20%	0,21%	4,43%	0,23%	0,22%

La Figure 124 illustre le cas du miroir 3M® PV/CSP, qui est plus le sensible. Dans cet exemple, la transition d'une réflectance spectrale faible dans la gamme solaire vers une réflectance élevée dans l'infrarouge a lieu à une longueur d'onde plus grande pour l'empilement optimisé avec le spectre solaire modifié (courbe verte), c'est-à-dire le spectre réfléchi par le

miroir 3M[®] PV/CSP (courbe noire), que pour l'empilement optimisé avec un spectre solaire non modifié (courbe bleue). En effet, le miroir 3M[®] PV/CSP n'a pas une réflectance solaire très élevée puisqu'il ne réfléchit pas la gamme 700-1000 nm (courbe noire). Ainsi la densité de flux disponible après réflexion est bien plus faible que sans réflexion. Pour compenser, le revêtement doit donc être plus sélectif en diminuant son émittance corps noir afin de conserver un rendement héliothermique élevé. Nous observons également dans le visible que le spectre de réflectance (courbe verte) a une forme de « W » afin de s'adapter parfaitement au spectre solaire incident modifié (courbe noire).

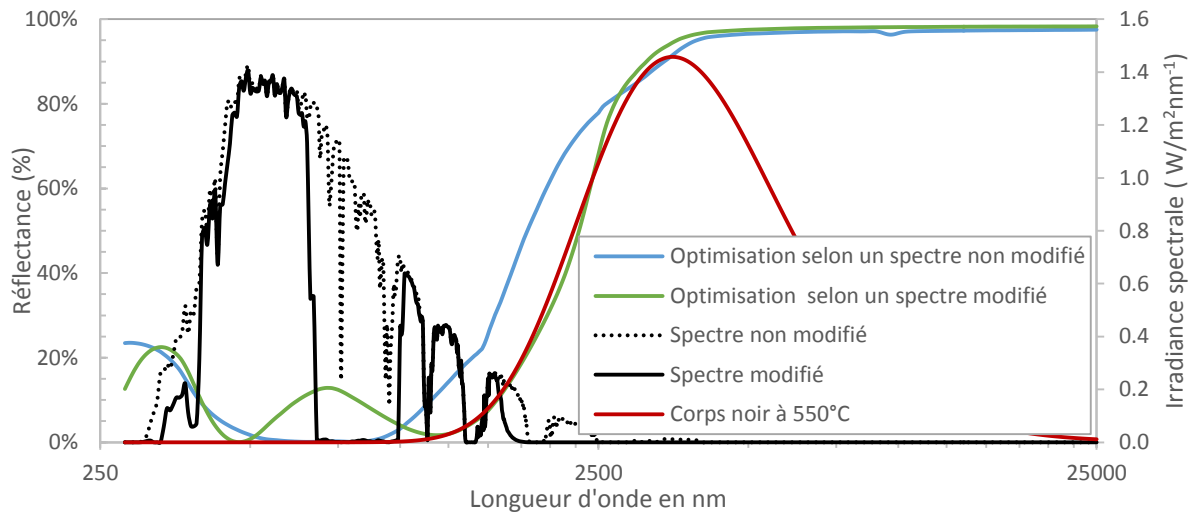


Figure 124 : Réflectance d'un empilement spectralement sélectif avec et sans modification du spectre solaire par un miroir 3M[®] PV/CSP, pour $C = 80$, $T = 823$ K

4.4. Effet de la géométrie de l'absorbeur thermique

Dans l'ensemble des modélisations effectuées jusqu'ici, l'absorbeur thermique est considéré comme plan, ce qui signifie que la surface absorbant le rayonnement solaire est la même que la surface émettrice de rayonnement infraouge (pertes radiatives). Or, dans le cas réel, on retrouve des absorbeurs thermiques non plans, comme les tubes absorbeurs sous vide (voir chapitre I, §3.1, p.32), pour lesquels la surface émettrice correspond à la surface du tube complet, tandis que la surface absorbante est plus réduite car tout le tube ne reçoit pas le rayonnement solaire concentré. Pour étudier cet effet, nous avons effectué des modélisations en tenant compte d'une pondération de l'émittance corps noir selon un facteur géométrique f_g , compris entre 1 et 4, entre l'absorptance solaire (A_s) et l'émittance corps noir (E_{CN}). L'équation du rendement héliothermique est alors donnée par l'équation (VI-2).

$$\eta_{th} = \frac{A_s \cdot C \cdot J_i - E_{CN}(T_{abs}) \cdot f_g \cdot \sigma(T_{abs}^4 - T_0^4)}{C \cdot J_i} \quad (VI-2)$$

Un facteur géométrique de 1 désigne une surface plane, de 3,14 un cylindre, de 4 un carré, etc. Nous avons étudié des formes d'absorbeur thermique autres que le cylindre car certains collecteurs solaires peuvent les intégrer. Il s'agit typiquement de technologies dans lesquels l'absorbeur thermique est fixe, souvent dans une cavité, comme les lentilles de Fresnel linéaires

[203], le collecteur Heliotrope® [28], les collecteurs de Cassegrain [51] et les centrales à tour [47]. Des exemples sont présentés dans le chapitre I. La Figure 125 illustre le rendement héliothermique d'un revêtement sélectif W/W-Al₂O₃/Al₂O₃ optimisé pour deux couples concentration/température différents, à savoir : $C = 80$ et $T = 573$ K (en rouge), cas où l'absorptance solaire est la grandeur prépondérante à maximiser (voir §2.4, p.199) ; $C = 30$ et $T = 823$ K (en noir), cas où l'émissance corps noir est la grandeur prépondérante à minimiser.

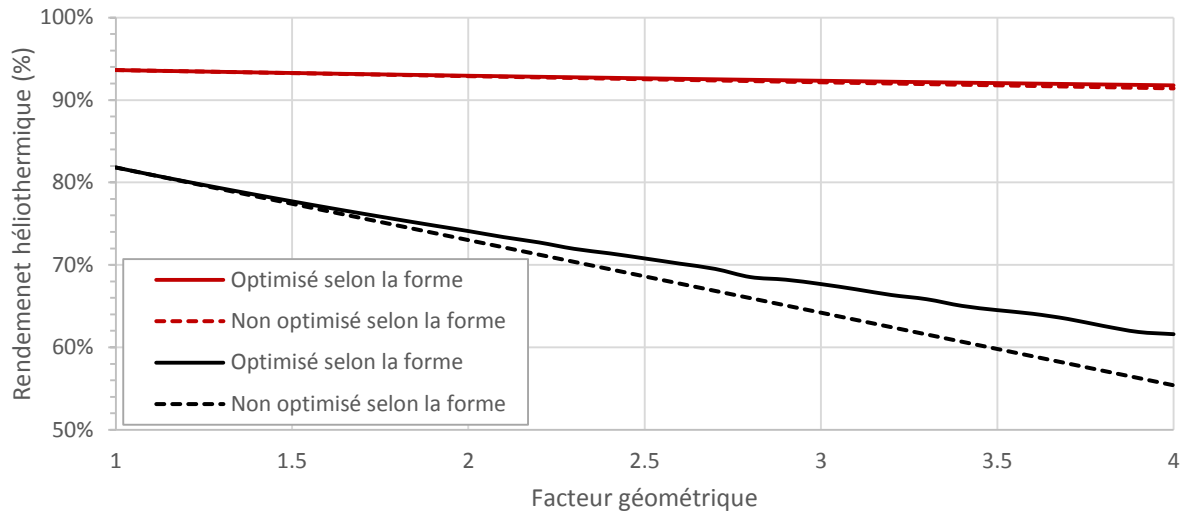


Figure 125 : Rendement héliothermique d'un revêtement sélectif W/W-Al₂O₃/Al₂O₃ pour deux couples concentration/température (en rouge $C = 80$ et $T = 573$ K, en noir $C = 30$ et $T = 823$ K), tenant (traits pleins) ou non (pointillés) compte d'un facteur géométrique dans l'optimisation du revêtement

Nous observons dans les deux cas une décroissance du rendement héliothermique, beaucoup plus marquée pour le second cas ($C = 30$ et $T = 823$ K). Cela s'explique par le rôle plus important des pertes thermiques à haute température, dues à l'émissance corps noir, dans le rendement héliothermique. Il est donc indispensable dans ce cas d'optimiser l'empilement spectralement sélectif en tenant compte du facteur géométrique (Figure 125, trait noir plein), ce qui permet de mieux adapter le compromis entre absorptance solaire et émissance corps noir aux conditions opératoires. Ainsi, un rendement héliothermique plus élevé peut être obtenu à haute température, avec un gain de 4 à 5% pour des récepteurs cylindriques et cavité.

D'autre part, pour une température d'absorbeur de 573 K, nous avons effectué plusieurs modélisations avec deux taux de concentration différents ($C = 30$ et 80) en faisant varier le facteur géométrique (Figure 126). Les courbes de rendement héliothermique en fonction du rapport taux de concentration / facteur géométrique se chevauchent parfaitement. Cela signifie que, pour une même température d'absorbeur, il est possible de compenser l'effet négatif du facteur géométrique uniquement en adaptant le taux de concentration. Un revêtement sélectif pour un absorbeur plan ($f_g = 1$) fonctionnant à $C = 80$ a en effet le même rendement héliothermique et la même composition optimale (épaisseurs des couches minces, fraction volumique des cermets) qu'un absorbeur cylindrique ($f_g = \pi$) fonctionnant à $C = 80 / \pi \approx 25$. Ainsi, pour un récepteur non plan de facteur de forme f_g sous une concentration C ,

l'optimisation du revêtement sélectif peut être réalisée simplement en considérant un absorbeur plan et une concentration $C' = C \cdot f_g$.

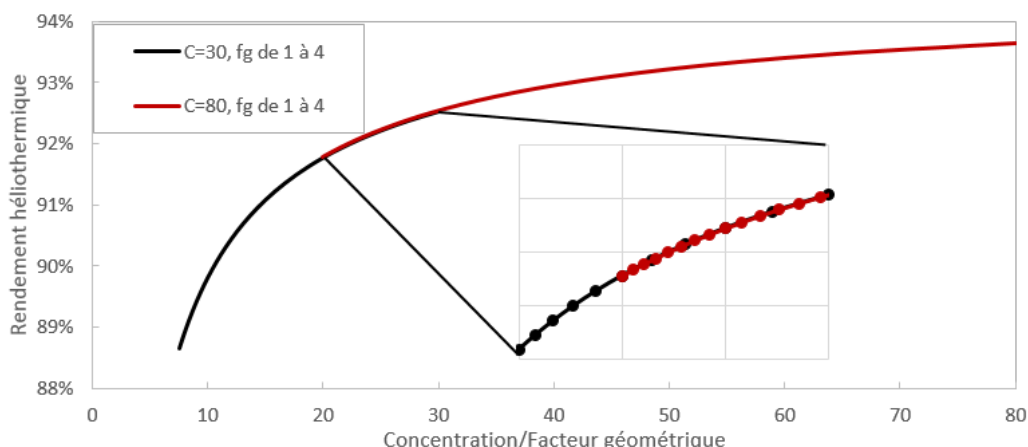


Figure 126 : Rendement héliothermique d'un revêtement sélectif W/W-Al₂O₃/Al₂O₃ pour une température de 573 K en fonction du rapport concentration/facteur géométrique

V. Absorption de spectres solaires locaux

Après avoir calculé les performances de différentes classes de multicouches sélectives optimisées pour le spectre solaire de référence ASTM G173-03 DC, essayons d'observer l'effet des spectres solaires locaux sur le rendement et l'optimisation de ces solutions. Le but est de tenter de montrer s'il est possible d'optimiser des revêtements sélectifs complets pour des conditions solaires locales. Comme pour les deux chapitres précédents sur les miroirs et les antireflets, nous travaillerons avec les deux jeux de spectres solaires locaux (chapitre III, §3.2 p.98 et §3.3 p.102) pour étudier et optimiser un exemple d'empilement spectralement sélectif de type métal/cermet/diélectrique antireflet W/W-Al₂O₃/Al₂O₃.

5.1. Spectres solaires locaux moyens

La figure 127 permet de comparer les rendements héliothermiques de l'empilement sélectif, obtenus à partir du spectre de référence mondiale (ASTM G173-03 DC) et des spectres solaires locaux de Paranal, Ouarzazate, Montsec, Mezaira, Sandia et Brisbane (chapitre III). Nous avons, en fonction de ces spectres, optimisé l'empilement sélectif (épaisseurs des couches minces et fraction volumique du cermet) pour maximiser le rendement héliothermique. Cette démarche permet de quantifier le gain de rendement entre un empilement spectralement sélectif optimisé au départ sur le spectre de référence et utilisé dans des conditions locales (en bleu), et ce même empilement optimisé pour les conditions locales (en rouge). Les résultats sont présentés pour $C = 80$ et $T = 823$ K. Ces résultats sont illustratifs de tous les cas traités (concentrations $C = 10, 30, 80, 120$ et températures $T = 573$ K, 823 K).

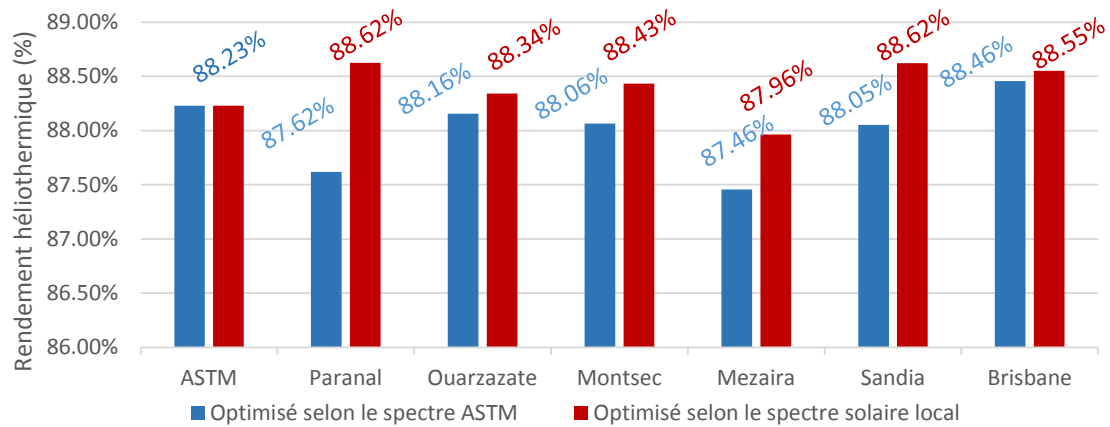


Figure 127 : Rendement héliothermique selon le spectre solaire ASTM G173-03 DC ou selon un spectre solaire local pour $C = 80$ et $T = 823$ K, avec optimisation du revêtement sélectif pour le spectre de référence ASTM (bleu) ou pour le spectre local (rouge)

Sans optimisation du revêtement sélectif selon le spectre solaire local (barres bleues), l'écart de rendement héliothermique entre les différents sites est relativement faible et ne dépasse pas 1%. Le rendement le plus bas (87,46%) est obtenu à Mezaira où l'irradiance est la plus faible (Table 34). Lorsque l'empilement est optimisé pour les conditions locales (barres rouges), nous observons des gains systématiques de rendement de l'ordre de 0,1 à 1%, pour toutes les concentrations et toutes les températures. Les gains les plus notables (+0,6 à 1%) sont obtenus pour les sites d'altitude de Paranal et Sandia où l'irradiance est la plus forte (Table 34).

Table 34 : Irradiance et DNI annuel des spectres solaires locaux

Grandeur	Unité	Paranal	Ouarzazate	Sandia	Mezaira	Montsec	Brisbane
Irradiance	W/m ²	1040	958	1014	828	961	920
DNI annuel	kWh/m ² /an	3536	2500	2638	2034	1800	1853

Cependant, une densité de flux absorbée plus élevée, liée à une augmentation du taux de concentration (Figure 106, p.199) ou de l'irradiance (W/m²) du spectre solaire, fait augmenter le rendement héliothermique. En analysant les résultats de la Figure 127 nous observons que l'augmentation de rendement héliothermique grâce à l'optimisation pour les spectres solaires locaux est proportionnelle à l'irradiance de ces derniers (Table 34), comme observé pour les sites d'altitude. De plus, nous avons observé que le gain est plus élevé pour les plus faibles taux de concentration (10 et 30) que pour les taux plus importants (80 et 120). Il est donc nécessaire de séparer le gain de rendement lié à une augmentation de l'irradiance locale et le gain lié à une meilleure absorption du spectre solaire local.

Nous avons donc effectué à nouveau chaque optimisation en utilisant uniquement le spectre solaire ASTM G173-03 DC mais en considérant pour chaque site un taux de concentration C' pondéré par le rapport des irradiances du spectre solaire local (J_{local} en W/m²) et du spectre ASTM (J_{ASTM} en W/m²), selon l'équation (VI-3).

$$C' = C \cdot \frac{J_{local}}{J_{ASTM}} \quad (VI-3)$$

Ainsi la densité de flux incidente sur l'empilement est identique dans les deux cas. De cette façon, si une augmentation du rendement héliothermique est observée, elle sera uniquement due à une meilleure absorption du spectre solaire local. La Table 35 montre le gain de rendement héliothermique obtenu en appliquant cette méthode d'optimisation (taux de concentration pondéré C') par rapport au rendement issu de l'optimisation initiale du revêtement pour le spectre ASTM (Figure 127, barres bleues) à un taux de concentration C .

Table 35 : Gain de rendement héliothermique de spectres solaires locaux par rapport au spectre ASTM en tenant compte de la différence d'irradiance

C	T (K)	Paranal	Ouarzazate	Montsec	Mezaira	Sandia	Brisbane
10	573	0,03%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%
30	573	0,02%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
80	573	0,03%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%
120	573	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
10	823	0,25%	0,54%	0,49%	0,65%	0,35%	0,61%
30	823	0,04%	0,00%	0,02%	0,01%	0,02%	0,00%
80	823	0,40%	0,02%	0,21%	0,01%	0,17%	0,00%
120	823	0,02%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%

Sauf pour deux couples de conditions opératoires particuliers, le gain de rendement est nul. Cela confirme notre idée : le levier principal de l'optimisation d'un empilement spectralement sélectif est de connaître précisément la densité de flux incidente, donc la densité de flux absorbée à travers le produit de la concentration et de l'irradiance (W/m^2) d'un spectre solaire. Il est possible d'adapter les empilements spectralement sélectifs aux spectres solaires locaux simplement en utilisant le spectre solaire de référence et en considérant un taux de concentration virtuel, pondéré par le rapport des irradiances locale et de référence (équation (VI-3)) lors de l'optimisation du revêtement.

Concernant les deux cas particuliers observés dans la Table 35 (gains de rendement non nuls, en vert) :

- $C = 10$ et $T = 823$ K : les valeurs présentées ici sont de simples constats auxquels nous proposons une explication, après avoir refait les calculs et éliminé d'autres hypothèses. Ces conditions opératoires sont peu réalistes, et de plus peu propices à la conversion héliothermique, avec des rendements faibles (compris ici entre 64 et 68%). L'empilement doit donc impérativement minimiser son émittance corps noir (zone 3, §2.4 p.199). Pour des spectres solaires locaux nous observons, par rapport au spectre solaire ASTM G173-03 DC, une fréquence de coupure (longueur d'onde à partir de laquelle la réflectance augmente subitement) plus faible, proche du visible. Cela permet de diminuer l'émittance corps noir et donc d'augmenter le rendement héliothermique par rapport à un spectre solaire ASTM. Cela traduirait bien une meilleure adaptation de la réflectance par rapport aux spectres incidents, et donc une prise en compte des conditions locales.

- $C = 80$ et $T = 823$ K : le léger gain de rendement est cette fois lié à un changement d'optimum dans la composition du cermet. Une grande partie du problème est expliquée en amont (Figure 108, p.201). A ces conditions opératoires, nous sommes très proches du changement de mode d'optimisation du revêtement sélectif (passage de la zone 2 à la zone 3) s'accompagnant d'une forte augmentation de la fraction volumique optimale du cermet. Sommairement il existe deux choix pour le cermet : une fraction volumique proche de 22% avec un couple absorptance/émittance corps noir de 0,92 / 0,11, ou une fraction volumique supérieure à 40% avec un couple A_s / E_{CN} de 0,91 / 0,09. En fonction de la densité de flux incident, le couple A_s / E_{CN} conduisant au meilleur rendement héliothermique est différent. Cette différence entraîne des gains de rendement de l'ordre de 0,17 à 0,4% en fonction de l'irradiance des spectres solaire locaux.

5.2. Spectres locaux avec suivi annuel de l'irradiance spectrale

Une autre option permettant d'optimiser les solutions multicouches et de visualiser l'effet de la forme des spectres locaux consiste à utiliser un spectre moyenné issu du suivi annuel de l'irradiance spectrale (chapitre III, §3.3 p.102). Nous avons donc utilisé la base de données de suivi annuel des spectres solaires des 8 sites introduits dans le chapitre III pour évaluer l'absorptance solaire annuelle de différents empilements spectralement sélectifs [94]. Nous avons pour cela sélectionné deux exemples d'empilements sélectifs de type W (métal) / W- Al_2O_3 (cermet) / antireflet Al_2O_3 . Ils sont décrits sur la Figure 128 : un empilement bicouche métal/cermet avec couche antireflet (performance moyenne) et un empilement à trois bicouches métal/cermet avec couche antireflet (très haute performance).

Les empilements sont optimisés pour deux couples concentration/température différents :

- Une concentration de 120 et une température de 573 K, soit un revêtement maximisant l'absorptance solaire (zone 1, §2.4 p.199) pour maximiser le rendement héliothermique.
- Une concentration de 10 et une température de 823 K, soit un traitement avec un compromis entre absorptance solaire et émittance corps noir (zone 3, §2.4 p.199).

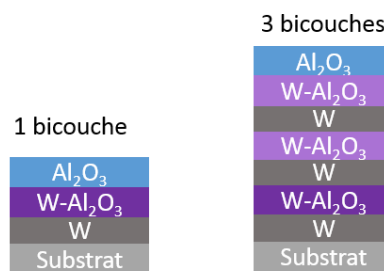


Figure 128 : Empilements spectralement sélectifs à bicouches métal/cermet

La Table 36 donne l'absorptance solaire annuelle, calculée avec les spectres solaires locaux. Les plus hautes valeurs observées sont en vert, les plus basses en rouge, pour chaque type d'empilement. La Figure 129 montre la réflectance spectrale des deux empilements optimisée pour les deux couples concentration/température utilisés, soit quatre possibilités.

Table 36 : Absorptance solaire annuelle en fonction du type d'empilement, des conditions opératoires et du site considéré

	$C = 120 / T = 573 \text{ K}$ 1 bicouche	$C = 120 / T = 573 \text{ K}$ 3 bicouches	$C = 10 / T = 823 \text{ K}$ 1 bicouche	$C = 10 / T = 823 \text{ K}$ 3 bicouches
ASTM	95,03%	98,31%	86,03%	90,49%
Palaiseau	95,13%	98,42%	85,30%	89,68%
Ilorin	95,02%	98,40%	84,79%	89,01%
Nauru	95,15%	98,43%	86,74%	91,10%
Dakar	95,17%	98,41%	85,51%	89,76%
Xianghe	94,96%	98,34%	83,41%	88,71%
Sede Boqer	94,77%	98,25%	82,46%	88,78%
Solar Village	95,07%	98,36%	85,48%	89,92%
Izana	94,96%	98,30%	85,47%	90,03%
Max - Min	0,4%	0,18%	4,28%	2,39%

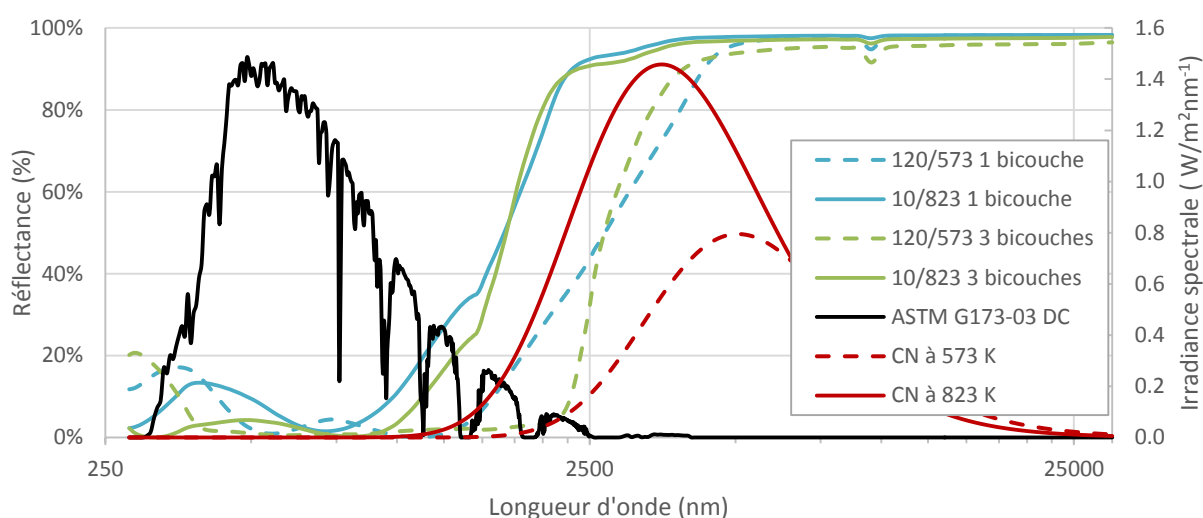


Figure 129 : Réflectance spectrale de deux empilements sélectifs (un ou trois bicouches métal/cermet W/W-Al₂O₃ avec antireflet Al₂O₃) pour deux couples concentration/température de 120/573 K et 10/823 K

Au vu des résultats (Figure 129 et Table 36), les différences d'absorptance solaire annuelle entre les différents sites sont directement liées aux conditions opératoires pour lesquelles l'empilement a été optimisé.

- **Pour un taux de concentration de 120 et une température de 573 K**, l'empilement peut absorber la majorité de la densité de flux solaire (principalement contenue de 280 à 2500 nm) car les pertes radiatives dues à l'émission corps noir sont modérées et clairement situées au-delà de 2500 nm (Figure 129). L'augmentation de la réflexion (courbes en pointillés) a lieu à une longueur d'onde élevée, vers 2000 à 2500 nm, permettant aux longueurs d'onde inférieures à cette valeur, soit une large partie du spectre solaire, d'être absorbées. Ainsi, tous les spectres solaires locaux, indépendamment de leurs irradiances spectrales (Wm²nm⁻¹), peuvent être bien absorbés. Nous observons donc des écarts d'absorptance solaire annuelle faibles, inférieures à 0,4%, entre les différents sites, aussi

bien pour des absorbeurs de moyenne qualité (simple bicouche) que de très haute qualité (triple bicouche).

- **Pour un taux de concentration de 10 et une température de 823 K** (cas certes peu réaliste car il est difficile d'atteindre cette température élevée à ce niveau de concentration faible, mais cependant intéressant à étudier car très illustratif des problématiques des revêtements sélectifs), l'empilement doit prioritairement minimiser les pertes radiatives dues à l'émission du corps noir à 823 K, qui est à la fois plus intense et plus proche du visible que celle du corps noir à 573 K. Pour cette raison, la bascule de faible à forte réflectance (coupure) intervient dès 1500 nm (Figure 129, traits pleins). Cela prive l'empilement de l'absorption du rayonnement solaire de 1500 à 2500 nm. Le domaine spectral d'absorption solaire est donc réduit et les spectres solaires locaux sont mal absorbés, menant à des rendements bien plus faibles que dans le cas précédent (Table 36) ; d'autant plus que les spectres locaux issus du suivi annuel montrent des différences importantes dans le proche infrarouge par rapport au spectre solaire ASTM, car les spectres de lever ou de coucher de soleil, systématiquement pris en compte dans le suivi, contiennent quantitativement plus d'infrarouge (voir annexes du chapitre III, §3.4, p.289). Ces spectres matinaux et de fin de journée sont donc moins bien absorbés par l'empilement sélectif, car celui-ci se prive de l'absorption des infrarouges à partir de 1500 nm. Ainsi nous observons des écarts élevés d'absorptance solaire annuelle entre les sites. Cet écart est de 4,28% pour un empilement de moyenne qualité (un bicouche) et de 2,39% pour un empilement de haute qualité (trois bicouches). La différence entre les deux empilements provient de leurs réflectances respectives : un empilement de haute qualité absorbe mieux les courtes longueurs d'onde et a une longueur d'onde de coupure plus éloignée (Figure 129).

Bilan

En conclusion, les performances des empilements spectralement sélectifs dépendent du site d'implantation et des conditions opératoires (concentration/température). Les différences de performances entre les sites, de spectres solaires différents, tendent à diminuer si l'empilement présente au départ des performances élevées tel qu'optimisé pour le spectre de référence mondiale. En particulier, l'énergie annuellement absorbée par un empilement de haute qualité, c'est-à-dire très absorbant/sélectif (par exemple un tricouche métal/cermet), est moins sensible aux variations locales du spectre solaire que pour un absorbeur de moyenne qualité. De même, si la longueur d'onde de coupure (changement de faible à forte réflectance) est trop courte (1500 nm), on observera des écarts importants dans l'énergie absorbée annuellement entre différents sites, dû à une mauvaise absorption globale du rayonnement incident, notamment des spectres solaires de début et fin de journée, plus riches en infrarouge.

VI. Conclusion du chapitre VI

Les empilements spectralement sélectifs sont une interface clef des centrales solaires à concentration, car ils permettent de convertir la densité de flux solaire en chaleur tout en minimisant les pertes thermiques. Cette réduction des pertes est indispensable pour maximiser l'énergie présente dans le fluide caloporteur qui pourra ensuite être stockée et convertie en électricité. Les propriétés optiques désirées peuvent être obtenues par un empilement de plusieurs couches minces composé de matériaux différents : métaux, diélectrique et cermet. Une couche mince seule ne permet pas d'obtenir de phénomène spectralement sélectif marqué.

Dans ce chapitre nous avons démontré la forte dépendance aux conditions opératoires d'un empilement spectralement sélectif pour optimiser le rendement héliothermique. C'est le principal levier d'optimisation permettant des rendements de conversion plus importants. Le nombre de couches minces, les épaisseurs des couches minces et les fractions volumiques des cermets varient lorsque la concentration et la température changent. Ces deux paramètres sont intrinsèques à une technologie de collecteur solaire. Il est donc possible, et nécessaire, d'optimiser les empilements en fonction des conditions opératoires du collecteur solaire utilisé. Un bon exemple concerne les antireflets des empilements sélectifs : leurs nombres de couches et leur nature (dense ou poreuse) permettent bien d'augmenter la conversion du rayonnement et varient en fonction des conditions opératoires. Dans un second temps, les matériaux utilisés dans les empilements peuvent eux aussi être adaptés, certains matériaux étant optiquement plus performants que d'autres sur une plage d'utilisation donnée.

Dans la suite du chapitre nous avons étudié l'ensemble des effets additionnels, tels que la rugosité ou la tolérance aux erreurs d'épaisseurs des couches ou de fraction volumique des cermets. Malgré une apparente complexité, les empilements spectralement sélectifs sont parfaitement réalisables. Des rugosités modérées (inférieures à 10 nm) ou des erreurs d'épaisseur ou de fraction volumique de quelques nm ou % sanctionnent relativement peu les performances de l'empilement (perte de rendement $< 1\%$). De même, si nous désirons adapter le revêtement à la forme de l'absorbeur ou aux conditions locales d'ensoleillement, une simple pondération du taux de concentration par le facteur géométrique ou l'irradiance solaire locale lors de l'optimisation permet de tenir compte de ces spécificités.

Chapitre VII

Exergie du rayonnement : usage en énergie solaire

I. Introduction du chapitre VII

Dans le contexte actuel qui nous a poussés à entreprendre des recherches en énergie solaire, la réduction des gaz à effet de serre, la limite des ressources naturelles et la production d'énergie issue de ressources renouvelables sont des enjeux cruciaux. Pour faire face à ces défis, nous avons abordé dans les chapitres précédents l'utilisation de l'énergie solaire par un collecteur solaire à concentration grâce aux trois types d'interfaces (réfléchissantes, transparentes, absorbantes). L'objectif était simple : maximiser la quantité d'énergie transmise au fluide caloporteur par unité d'aire de collecteur déployé. Mais nous ne nous sommes pas intéressés à l'analyse de l'utilisation future de cette énergie. Nous avons raisonné dans une démarche quantitative et non qualitative.

La notion d'exergie, issue de la thermodynamique, offre un cadre standard et rigoureux à l'analyse des systèmes énergétiques. Si l'énergie désigne la capacité d'un système à produire du travail et/ou de la chaleur, l'exergie permet de calculer le travail maximal récupérable par un utilisateur. Cette notion participe donc à une meilleure compréhension et une meilleure gestion des systèmes en permettant d'analyser et de juger la qualité d'une énergie. Pour cela, cette notion place le système énergétique, l'environnement et l'utilisateur au cœur de la problématique. C'est donc un puissant outil d'analyse et de décision pour un développement durable.

Dans ce chapitre, nous étudierons premièrement l'exergie reçue par une surface irradiée, c'est-à-dire la quantité de travail que peut produire un procédé solaire, recevant de l'énergie radiative au travers de cette surface. Nous appliquerons ensuite la méthode aux spectres solaires réels et locaux modélisés dans le chapitre III.

1.1. La notion d'exergie

La notion d'exergie peut se définir avec son étymologie, créée en 1956 par Zoran Rant [204]. Ce terme est composé du grec $\epsilon\kappa$ (ex), ici dans le sens de « externe », et de $\epsilon\rho\gamma\omega$ (ergon) « le travail ». L'exergie d'un système est une grandeur permettant d'évaluer le travail maximum que peut produire ce système lorsqu'il se met en équilibre thermodynamique avec un « réservoir ». Ce réservoir est souvent assimilé à l'environnement ambiant entourant le système, caractérisé comme pour le système par une ou plusieurs variables d'état : pression, volume, température et éventuellement potentiel chimique des composants. Plus un système est loin de l'équilibre par rapport à l'environnement ambiant, plus il est apte à opérer un changement produisant au passage un travail. La notion d'exergie permet de déterminer quantitativement ce travail. Lorsque le système est en équilibre thermique, son exergie devient nulle. Certains thermodynamiciens parlent alors d'état mort.

1.2. Intérêt de l'analyse exergetique

L'utilisation de la notion de l'exergie apporte de nombreux avantages en termes d'analyse et d'optimisation de systèmes.

L'analyse des ressources énergétiques

La notion d'exergie offre un cadre d'analyse identique pour comparer différentes sources d'énergie ou différents processus de conversion. Un exemple est présenté dans la Figure 130. Les ressources énergétiques disponibles ont toutes différentes formes : nucléaire, thermique (par exemple géothermique), rayonnante (solaire), chimique (pétrole, biomasse) et mécanique (hydraulique, éolien). Cette diversité des ressources et des besoins induit une grande diversité des processus de transformation énergétique qui ont eux-mêmes conduit à des méthodes de caractérisation différentes dans leur ressource énergétique [205]. L'analyse en exergie permet de les comparer de façon pertinente, en quantifiant, pour chacune d'entre elles, le travail (ou la puissance) mécanique maximum (maximale) que l'on peut en tirer.

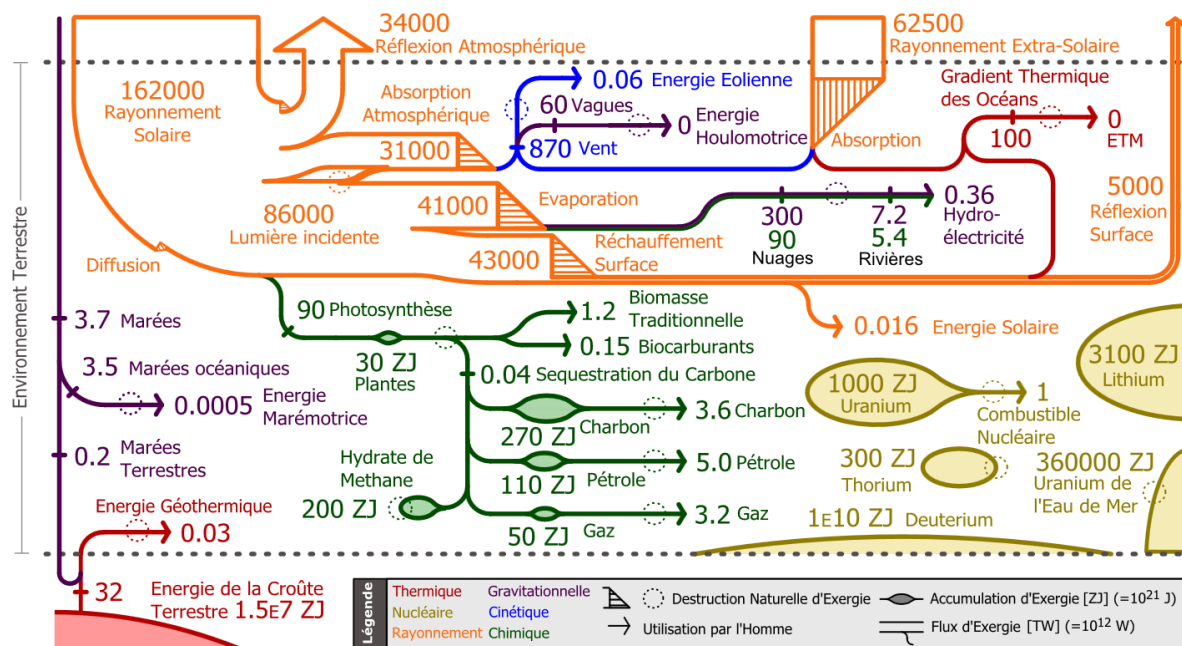


Figure 130 : Flux, destruction et accumulation d'exergie à l'échelle de la planète [205]

Optimisation des procédés de conversion

Le second intérêt de l'analyse exergétique est l'amélioration et l'optimisation des systèmes et des procédés de conversion de l'énergie. Cette démarche découle du point précédent. Une optimisation n'est possible que lorsque l'on dispose d'un critère permettant l'analyse d'un système et mettant à jour ses forces et faiblesses. L'optimisation énergétique d'un procédé vise à améliorer l'efficacité de la conversion, à savoir, le rapport entre l'effet utile (énergie, puissance ou quantité de matière produite ; noté q) et l'énergie (ou la puissance : noté w) consommée. Cette efficacité, ou facteur de mérite, dépend du procédé envisagé :

- Rendement énergétique pour les moteurs thermiques : $\eta = w / q$.
- Coefficient de performance pour les machines frigorifiques et pompes à chaleur : $COP = q / w$.
- Efficacité du stockage pour les systèmes de stockage thermique.
- Rendement PCI pour la production de combustible; par exemple, pour la production d'hydrogène : $\eta = N_{H_2} \text{ PCI} / q$.

Pour chaque procédé de conversion, il est possible d'exprimer l'efficacité de la conversion comme le produit de deux facteurs : l'efficacité maximale de conversion, correspondant à un procédé de conversion réversible (η_{rev}), et le rendement exergetique du procédé de conversion (η_{ex}), compris en 0 et 1, qui rend compte des irréversibilités inhérentes au procédé réel [206]. Illustrons par exemple à l'aide de la Figure 131 quatre procédés de conversion. Nous retrouvons la production d'électricité à partir de chaleur (a), la production de froid (b), le stockage de chaleur (c) et la production de matière (d), ici de l'hydrogène.

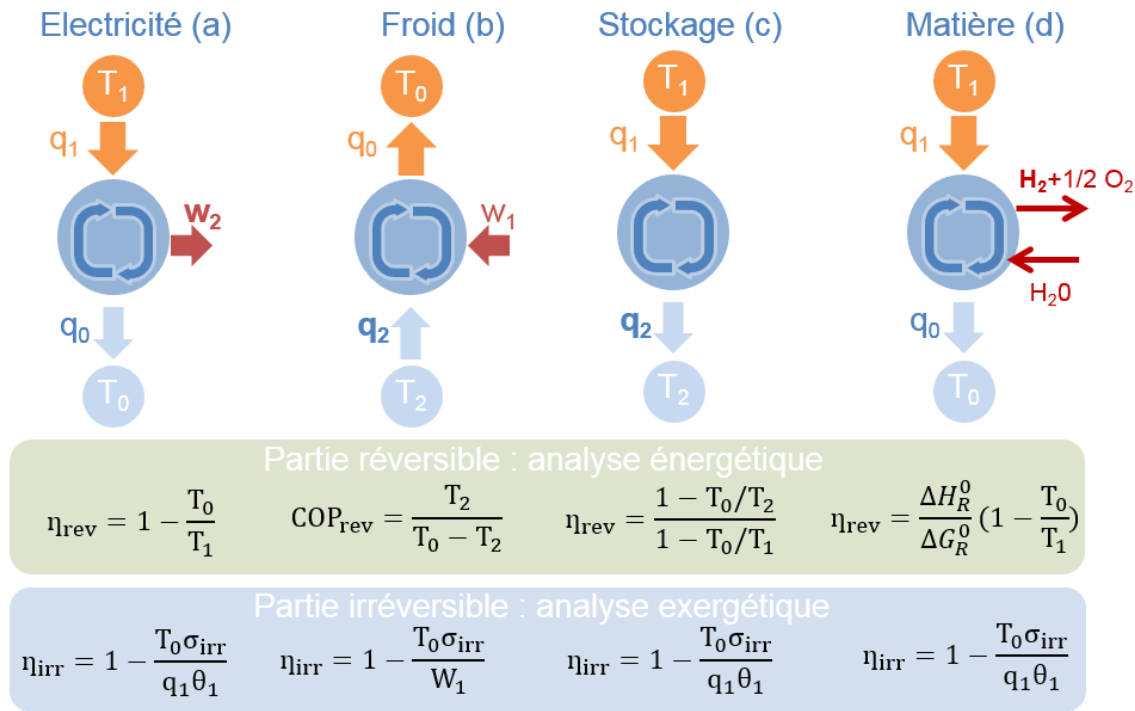


Figure 131 : Procédés de conversion entre deux sources de température [206]

Les efficacités réversibles (η_{rev} ou COP_{rev}) ne sont pas directement optimisables par l'ingénierie. En effet, dans chaque exemple présenté dans la Figure 131, le rendement réversible ne dépend que du cahier des charges définissant le procédé, par exemple :

- Pour une production d'électricité, la température de l'environnement (T_0) est fixe pour un lieu d'installation donné tandis que la température (T_1) est liée au choix de la source chaude : température de l'absorbeur pour le solaire ($\approx 550^\circ\text{C}$ pour les sels fondus [57]), température de flamme pour les combustibles ($\approx 1000^\circ\text{C}$ pour le gaz naturel [207]) ou encore la température du réacteur pour le nucléaire ($\approx 325^\circ\text{C}$) [207].
- Pour la production de froid : la température de l'environnement local impose T_0 et les normes en vigueur imposent T_2 (-18°C pour les chambres froides par exemple).
- Pour le stockage, les procédés en amont ou en aval imposent les deux températures de stockage (T_1) et de déstockage (T_2).
- Pour la production de matière, enthalpie et enthalpie libre de réaction sont déterminées par la thermochimie, et la température T_1 est, comme pour la production d'électricité, imposée par la source chaude utilisée.

Deux voies d'optimisation sont donc possibles :

- Augmenter l'efficacité réversible de conversion par l'utilisation de nouvelles sources de chaleur, c'est-à-dire en modifiant la technologie liée à la source chaude,
- Augmenter le rendement exergetique du procédé, c'est-à-dire diminuer les irréversibilités internes de ce dernier.

1.3. L'exergie radiative

Les expressions données dans la Figure 131 s'appliquent à des convertisseurs utilisant une puissance thermique comme source d'énergie (q_1) et d'exergie ($q_1 \theta_1$). L'énergie solaire étant de type radiatif, les convertisseurs solaires doivent être analysés comme des procédés de conversion d'énergie radiative en travail et chaleur. Plusieurs auteurs ont étudié de tels convertisseurs, en considérant la détente réversible d'un gaz de photons dans un système cylindre/piston, entre un état initial à la température du soleil T_s et un état final à la température de l'environnement T_0 [208]. Ces études conduisent à trois expressions différentes, rappelées dans la Table 37, du rendement maximum de conversion solaire défini par l'équation (VII-2).

$$\eta_{sol} = \frac{\dot{w}}{\dot{q}_{sol}} \quad (\text{VII-2})$$

Table 37 : Rendement de conversion maximum d'un rayonnement émis par un corps noir selon les différents auteurs

Petela [209]	Jeter [210]	Spanner [211]
<i>Travail utile</i>	<i>Travail net d'un moteur</i>	<i>Travail absolu</i>
$1 - \frac{4 T_0}{3 T_s} + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_s} \right)^4$	$1 - \frac{T_0}{T_s}$	$1 - \frac{4 T_0}{3 T_s}$
$\eta_{\text{Petela}} = 93,4\%$	$\eta_{\text{Jeter}} = 95,0\%$	$\eta_{\text{Spanner}} = 93,4\%$

Bien que toutes amènent des valeurs proches (calculées ici avec $T_0 = 288,1$ K et $T_s = 5800$ K), et par suite, puissent être utilisées indifféremment pour des études d'ingénierie, elles diffèrent dans la définition de l'exergie associée au rayonnement. Bejan [208] a résolu la controverse qui a suivi en montrant que ces différences provenaient des définitions du travail valorisable par l'utilisateur, toutes acceptables. Pour les études concernant l'énergie solaire concentrée, les chercheurs utilisent soit la définition de Petela [212], soit celle de Jeter [213]. Remarquons toutefois qu'A. Bejan limite son champ d'étude par le titre qu'il choisit, qui mentionne explicitement : *Enclosed Radiation* [208]. On peut se demander, à la suite de Wright [212], si ces résultats sont applicables aux systèmes de concentration/absorption existants. En effet, la conversion de l'énergie solaire passe par plusieurs processus : captation, concentration et absorption, phénomènes essentiellement de surface, et non de volume comme décrit dans les approches citées précédemment.

L'objectif de cette étude est tout d'abord de clarifier la notion d'exergie associée au rayonnement solaire concentré et de définir rigoureusement le rendement de conversion maximal que l'on peut attendre des convertisseurs d'énergie solaire concentrée, qu'ils soient thermodynamiques (T), photovoltaïques (PV), ou hybrides (PVT). On étudiera alors l'impact de l'atmosphère et du spectre solaire réel sur ce rendement maximal de conversion. Enfin, on appliquera la méthodologie développée à une surface absorbante réelle, caractérisée par ses propriétés optiques.

II. Grandeurs thermodynamiques liées aux flux radiatifs

L'analyse exergetique des convertisseurs solaires nécessite de calculer et de manipuler l'énergie et l'entropie associées à un rayonnement électromagnétique. Il est donc nécessaire de définir rigoureusement ces grandeurs.

2.1. Définition des corps

Le modèle radiatif définit plusieurs types de corps, c'est-à-dire des objets idéaux qui interagissent avec l'énergie électromagnétique. Ces corps suivent une série d'hypothèses [214] :

- Les phénomènes physiques conduisant à modifier la longueur d'onde du rayonnement (luminescence, diffusion Raman, optique non linéaire) sont négligés. La relation de conservation de l'énergie devient applicable sur l'ensemble du domaine spectral.
- Les corps sont orthotropes, c'est-à-dire des émetteurs diffus : les radiations sont émises isotropiquement, indépendamment de leurs directions.
- Les corps sont en équilibre thermique avec leur environnement. Selon la loi de Kirchhoff, l'émission et l'absorption de radiations sont strictement égales $\varepsilon(\lambda, T, \theta) = \alpha(\lambda, T, \theta)$.
- Le rayonnement émis ou reçu n'est pas polarisé.

Corps noir

Un corps noir est un corps qui absorbe toutes les radiations électromagnétiques incidentes, indépendamment de leurs longueurs d'onde (λ), de la température (T) ou de l'angle d'incidence (θ). Conformément à la loi de Kirchhoff, c'est donc également un émetteur parfait, dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température. On retrouve : $\alpha = \varepsilon = 1$.

Corps blanc

Un corps blanc est un corps qui réfléchit toutes les radiations électromagnétiques incidentes, indépendamment de leurs longueurs d'onde (λ), de la température (T) ou de l'angle d'incidence (θ). C'est un miroir parfait, qui n'absorbe ni n'émet aucun rayonnement. On retrouve : $\alpha = \varepsilon = 0$.

Corps gris

Un corps gris est un corps ni blanc ni noir dont l'émissivité est constante à toutes les longueurs d'onde. On retrouve : $0 < \alpha(T) = \varepsilon(T) < 1$.

Corps réel

Un corps réel est un corps ni blanc ni noir dont l'émissivité est fonction de la longueur d'onde, de la température, et dans le cas général de la direction d'émission. Dans la suite, l'hypothèse de corps orthotrope (ou de surface lambertienne) permet de s'affranchir de la direction d'émission et la loi de Kirchhoff s'écrit : $0 < \alpha(T, \lambda) = \varepsilon(T, \lambda) < 1$.

2.2. Grandeurs radiométriques

La Table 38 présente les différentes grandeurs radiométriques utilisées dans la suite.

Table 38 : Grandeurs radiométriques

Nom	Symbole	Unité
Luminance (ou radiance) énergétique monochromatique	$K_{\Omega, \lambda}^{\circ}$	W/(m ³ sr)
Irradiance énergétique monochromatique	H_{λ}°	W/m ³
Irradiance énergétique ou densité de flux d'énergie	j_e	W/m ²
Luminance (ou radiance) entropique monochromatique	$L_{\Omega, \lambda}^{\circ}$	W/(m ³ sr ⁻¹ K)
Irradiance entropique monochromatique	I_{λ}°	W/(m ³ K)
Irradiance entropique ou densité de flux d'entropie	j_s	W/(m ² K)

Les luminances monochromatiques sont, par définition, les flux d'énergie ou d'entropie émis par un élément de surface dS , par unité d'angle solide $d\Omega$ pour les longueurs d'onde comprises entre λ et $\lambda + d\lambda$. Leurs expressions ont été établies par Planck [215]. Pour les surfaces lambertiennes (ou orthotropes), elles s'écrivent :

$$K_{\Omega, \lambda}^{\circ}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{\varepsilon(\lambda, T)}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (\text{VII-3})$$

$$L_{\Omega, \lambda}^{\circ}(\lambda, T) = \frac{2kc^2}{\lambda^4} \{ [1 + X(\lambda, T)] \ln[1 + X(\lambda, T)] - X(\lambda, T) \ln[X(\lambda, T)] \} \quad (\text{VII-4})$$

Avec :

$$X(\lambda, T) = \frac{\lambda^5 K_{\Omega, \lambda}^{\circ}(\lambda, T)}{2hc^2} = \frac{\varepsilon(\lambda, T)}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (\text{VII-5})$$

Les irradiances monochromatiques s'obtiennent en intégrant les luminances monochromatiques dans toutes les directions de l'hémisphère dans lesquels rayonne la surface émettrice. On obtient la loi de Lambert pour l'énergie :

$$H_{\lambda}^{\circ}(\lambda, T) = \int K_{\Omega, \lambda}^{\circ}(\lambda, T) d\Omega = \pi K_{\Omega, \lambda}^{\circ}(\lambda, T) \quad (\text{VII-6})$$

Pour l'entropie, on a de façon analogue :

$$I_{\lambda}^{\circ}(\lambda, T) = \int L_{\Omega, \lambda}^{\circ}(\lambda, T) d\Omega = \pi L_{\Omega, \lambda}^{\circ}(\lambda, T) \quad (\text{VII-7})$$

Enfin, l'intégration des irradiances monochromatiques sur la totalité du spectre donne les densités de flux (ou irradiances) émises par l'élément de surface dS :

$$j_e = \int_0^{+\infty} H_{\Omega, \lambda}^{\circ}(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{VII-8})$$

$$j_s = \int_0^{+\infty} I_{\Omega, \lambda}^{\circ}(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{VII-9})$$

Pour les corps noirs ou gris, l'intégrale apparaissant dans l'expression ((VII-8) est une intégrale définie, et l'on obtient une expression explicite de l'irradiance énergétique. C'est la loi de Stefan-Boltzmann.

$$j_e(T) = \varepsilon(T) \sigma_B T^4 \quad (\text{VII-10})$$

Avec $\sigma_B = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2}$: constante de Stefan et Boltzmann en $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Pour l'irradiance entropique, seule l'hypothèse du corps noir amène une expression analytique :

$$j_s(T) = \frac{4}{3} \sigma_B T^3 \quad (\text{VII-11})$$

Dans tous les autres cas, la détermination des irradiances entropiques requiert donc une intégration numérique.

III. Analyse thermodynamique des convertisseurs solaires

3.1. Description du système

Nous reprenons le système défini par De Vos [216], schématisé sur la Figure 132, et utilisé par la majorité des auteurs travaillant sur l'analyse thermodynamique de l'énergie solaire concentrée.

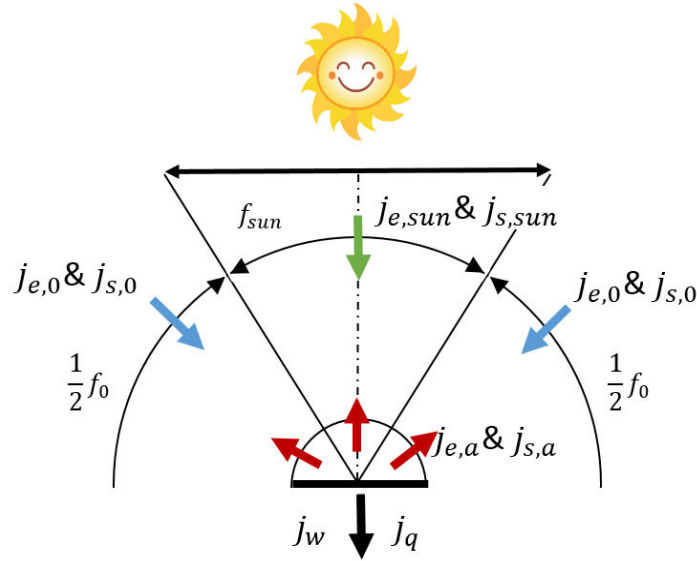


Figure 132 : Bilan thermodynamique d'une surface à température constante

- L'élément de surface reçoit une densité de flux énergétique $j_{e,sun}$ et entropique $j_{s,sun}$ provenant du concentrateur. Les grandeurs physiques propres au soleil sont notées avec l'indice « sun » et correspondent à la flèche verte (Figure 132). Les densités de flux sont proportionnelles au facteur de forme du Soleil perçu par la surface. Le facteur de forme (f_{sun}) est une fonction du taux de concentration et de l'angle solide du soleil Ω_s , ou du demi-angle solaire α_s :

$$f_{sun} = \frac{C\Omega_s}{\pi} = C \sin^2(\alpha_s) \quad (\text{VII-12})$$

Avec $\alpha_s \approx 16'$ et $\Omega_s = 6,7905 \cdot 10^{-5}$ sr

- L'élément de surface reçoit les densités de flux énergétique $j_{e,0}$ et entropique $j_{s,0}$ de l'environnement ambiant, modélisé par un corps noir à une température T_0 , et correspondant aux deux flèches bleues (Figure 132). Les grandeurs physiques propres à l'environnement sont notées avec l'indice « 0 ». La densité de flux reçu est proportionnelle à l'angle solide sous lequel l'élément de surface perçoit l'environnement. Le facteur de forme de l'environnement est noté f_0 .

$$f_0 = \frac{\pi - C\Omega_s}{\pi} = 1 - f_{sun} \quad (\text{VII-13})$$

- L'élément de surface réfléchit les densités de flux énergétique et entropique j_ρ , fraction des deux flux incidents : celui du soleil (j_{sun}) et celui de l'environnement (j_0).
- L'élément de surface, supposée lambertienne, émet, de façon isotrope, une densité de flux énergétique $j_{e,a}$ et entropique $j_{s,a}$ dans l'environnement sur la totalité de l'hémisphère. Cela correspond aux flèches rouges (Figure 132). Les grandeurs physiques propres à l'absorbeur sont notées avec l'indice « a ».
- L'élément de surface considéré appartient à la surface irradiée d'un système convertissant l'énergie radiative en puissance électrique et thermique. Le convertisseur échange donc les

densités de flux j_w et j_q avec le milieu extérieur, représentant les puissances thermique et électrique produites par m^2 de surface irradiée.

Remarque : On peut également exprimer f_{sun} en fonction du taux de concentration maximum C_{max} , correspondant à $f = 1$. Ce taux de concentration théorique serait obtenu avec un immense miroir elliptique dont le soleil et l'élément de surface dS occuperaient chacun l'un des foyers [216]. D'après l'expression ((VII-12)) :

$$C_{max} = \sin^{-2}(\alpha_s) \approx 46260 \quad (VII-14)$$

et f_{sun} s'écrit :

$$f_{sun} = C/C_{max} \quad (VII-15)$$

La valeur calculée en (VII-14) est le taux de concentration maximum atteignable sur Terre, sans rayonnement circumsolaire (voir chapitre II, §2.2 p.93), pour un système de concentration ponctuel (centrale solaire à tour, parabole, etc). Le même raisonnement conduit pour une concentration linéaire (Réflecteur Linéaire de Fresnel, cylindro-parabolique, lentille de Fresnel linéaire, etc.), amène $C_{max} \approx 215$ [3].

3.2. Densités de flux radiatif

Nous pouvons exprimer l'ensemble des densités de flux en énergie et en entropie reçus, réfléchis ou émis par l'élément de surface dS , en fonction des irradiances monochromatiques du Soleil (H_{sun} , I_{sun}), de l'environnement (H_0 , I_0) et de l'élément de surface absorbante (H_a , I_a). Ces expressions sont détaillées dans la Table 39.

L'irradiance monochromatique du Soleil (H_{sun}) peut être déterminée à partir de mesures, ou par modélisation de l'atmosphère (voir §4.2). Nous en déduisons l'irradiance monochromatique pour l'entropie (I_{sun}) d'après les équations ((VII-4)) et ((VII-5)). Pour l'environnement et l'élément de surface, les irradiances énergétiques et entropiques peuvent être calculées d'après les équations ((VII-3)) à ((VII-5)).

Table 39 : Densités de flux radiatif interagissant avec l'élément de surface dS (k étant le type d'émetteur)

	Energie	Entropie
k	$j_{e,k} (W.m^{-2})$	$j_{s,k} (W.m^{-2})$
sun	$f_{sun} \int_0^{+\infty} H_{sun}(\lambda) d\lambda$	$f_{sun} \int_0^{+\infty} I_{sun}(\lambda) d\lambda$
0	$f_0 \int_0^{+\infty} H_0(\lambda, T_0) d\lambda$	$f_0 \int_0^{+\infty} I_0(\lambda, T_0) d\lambda$

ρ	$\int_0^{+\infty} \rho(\lambda) [f_{sun} H_{sun}(\lambda) - f_0 H_0(\lambda, T_0)] d\lambda$	$\int_0^{+\infty} \rho(\lambda) [f_{sun} I_{sun}(\lambda) - f_0 I_0(\lambda, T_0)] d\lambda$
a	$\int_0^{+\infty} H_a(\lambda, T_a) d\lambda$	$\int_0^{+\infty} I_a(\lambda, T_a) d\lambda$

3.3. Bilan d'énergie, d'entropie et d'exergie

Les bilans énergétique et entropique appliqués au convertisseur, système supposé fermé, et opérant en régime stationnaire s'écrivent :

$$j_{e,sun} + j_{e,0} - j_{e,\rho} - j_{e,a} + j_q + j_w = 0 \quad (VII-16)$$

$$j_{s,sun} + j_{s,0} - j_{e,s} - j_{s,a} + j_q/T_a + \sigma_{irr} = 0 \quad (VII-17)$$

Soit, en faisant apparaître les flux radiatifs nets pour l'énergie j_e (W.m⁻²) et pour l'entropie j_s (W.m⁻².K⁻¹) :

$$j_e + j_q + j_w = 0 \quad (VII-18)$$

$$j_s + j_q/T_a + \sigma_{irr} = 0 \quad (VII-19)$$

Avec $j_e = j_{e,sun} + j_{e,0} - j_{e,\rho} - j_{e,a}$

$$j_s = j_{s,sun} + j_{s,0} - j_{e,s} - j_{s,a}$$

Les flux nets d'énergie et d'entropie s'écrivent, d'après les expressions de la Table 39 :

$$j_e(T_a) = \int_0^{\infty} \{[1 - \rho(\lambda)][f_{sun} H_{sun}(\lambda) + (1 - f_{sun}) H_0(\lambda, T_0)] - H_a(\lambda, T_a)\} d\lambda \quad (VII-20)$$

$$j_s(T_a) = \int_0^{\infty} \{[1 - \rho(\lambda)][f_{sun} I_{sun}(\lambda) + (1 - f_{sun}) I_0(\lambda, T_0)] - I_a(\lambda, T_a)\} d\lambda \quad (VII-21)$$

Pour un environnement et un dispositif de concentration donnés, ils ne dépendent que de la température de l'absorbeur T_a . Dans le système d'équations ((VII-18), (VII-19)), le second principe de la thermodynamique ((VII-19) peut être remplacé par la combinaison linéaire ((VII-18) - T_0 ((VII-19)), appelée bilan exergetique, avec T_0 la température de l'environnement.

$$j_q + j_w + j_e(T_a) = 0 \quad (VII-22)$$

$$j_q \theta_a + j_w + j_{ex}(T_a) = ex_d \quad (VII-23)$$

Où $j_{ex} = j_e - T_0 j_s$: densité de flux net d'exergie (W.m⁻²)

ex_d : destruction d'énergie, par unité d'aire (W.m⁻²)

$\theta_a = 1 - T_0 / T_a$: facteur de Carnot associé à la température T_a (-)

La densité de flux net exergétique s'écrit, d'après ((VII-20) et ((VII-21) :

$$j_{ex}(T_a) = \int_0^\infty \{[1 - \rho(\lambda)][f_{sun} B_{sun}(\lambda) + (1 - f_{sun}) B_0(\lambda, T_0)] - B_a(\lambda, T_a)\} d\lambda \quad (VII-24)$$

où nous avons défini l'irradiance monochromatique exergétique B_k pour chaque émetteur k : le soleil ($k = sun$), l'environnement ($k = 0$) et l'absorbeur ($k = a$).

$$B_k = H_k - T_0 I_k \quad (VII-25)$$

3.4. Rendement solaire des convertisseurs radiatifs

Considérons un convertisseur d'énergie solaire concentrée, constitué par l'association :

- D'un élément de surface irradiée, supposée à température uniforme T_a , et produisant la puissance¹ électrique $j_{w,V}$ et la puissance thermique j_q .
- D'un procédé thermomécanique, convertissant la puissance thermique j_q disponible en face arrière de l'élément absorbant en puissance mécanique $j_{w,T}$.

Ce convertisseur d'énergie radiative peut représenter trois types de technologie :

- un système de conversion hybride Photovoltaïque-Thermique (PVT),
- un système de conversion Photovoltaïque (PV)
- un système de conversion thermodynamique (T)

Convertisseurs hybrides PVT

Un convertisseur hybride Photovoltaïque-Thermique (PVT), convertit les densités de flux net radiatif énergétique j_e et exergétique j_{ex} en puissance utile électrique ($j_{w,V}$) et en puissance mécanique ($j_{w,T}$). La puissance utile totale est donc $j_{w,V} + j_{w,T}$. Ce convertisseur échange avec l'environnement la puissance thermique $j_{q,0}$ issue du convertisseur thermomécanique à la température T_0 . Les bilans d'énergie et d'exergie s'écrivent donc :

$$j_{q,0} + j_{w,V} + j_{w,T} + j_e(T_a) = 0 \quad (VII-26)$$

$$j_{q,0} \theta_0 + j_{w,V} + j_{w,T} + j_{ex}(T_a) = ex_d > 0 \quad (VII-27)$$

Le facteur de Carnot (θ_0) étant nul (la puissance thermique $j_{q,0}$ est échangée avec l'environnement à T_0), on en déduit :

$$j_{w,V} + j_{w,T} = -j_{ex}(T_a) + ex_d \quad (VII-28)$$

¹ Dans cette section, le vocable 'puissance' doit être compris comme puissance surfacique, en $W.m^{-2}$.

Le rendement solaire est défini par le rapport de la puissance électrique et/ou mécanique, et la puissance solaire incidente, soit :

$$\eta_{sol} = \frac{|j_{w,V} + j_{w,T}|}{j_{e,sun}} \quad (VII-29)$$

Le bilan exergétique ((VII-28) permet d'exprimer le rendement solaire d'un système PVT par :

$$\eta_{PVT} = \frac{j_{ex}(T_a)}{j_{e,sun}} \left(1 - \frac{ex_d}{j_{ex}(T)} \right) \quad (VII-30)$$

Convertisseurs photovoltaïques

Pour les convertisseurs photovoltaïques (PV), la puissance thermique n'est pas valorisée ($j_{w,T} = 0$), mais transférée directement à l'environnement ($j_{q,0} = j_q < 0$).

Les bilans énergétique et exergétique appliqués à l'élément de surface ((VII-22), (VII-23) amènent :

$$j_q = -j_e(T_a) - j_{w,V} \quad (VII-31)$$

$$j_{w,V} = \frac{-j_{ex}(T_a) + j_e(T_a) \theta_{abs} + ex_{d,a}}{1 - \theta_a} \quad (VII-32)$$

Ce qui permet d'exprimer le rendement solaire des convertisseurs PV sous la forme :

$$\eta_{PV} = \frac{j_{ex}(T_a) - j_e(T_a) \theta_a}{j_{sun}(1 - \theta_a)} \left(1 - \frac{ex_{d,a}}{j_{ex}(T_a) - j_e(T_a) \theta_a} \right) \quad (VII-33)$$

Convertisseurs thermodynamiques

Pour les convertisseurs thermodynamiques, la puissance électrique est nulle ($j_{w,V} = 0$). La puissance mécanique ($j_{w,T}$) produite est une fraction de la puissance exergétique disponible en face arrière de la surface absorbante :

$$j_{w,T} = j_q \theta_a \left(1 - \frac{ex_{d,T}}{j_q \theta_a} \right) \quad (VII-34)$$

Avec $ex_{d,T}$: exergie détruite dans le convertisseur thermomécanique

La puissance électrique $j_{w,V}$ étant nulle, le bilan énergétique appliqué à l'élément de surface ((VII-22) devient :

$$j_q = -j_e(T_a) \quad (VII-35)$$

Nous déduisons des équations ((VII-34) et ((VII-35) l'expression du rendement solaire d'un convertisseur thermomécanique:

$$\eta_T = \frac{j_e(T_a) \theta_a}{j_{sun}} \left(1 - \frac{ex_{d,T}}{j_q \theta_a} \right) \quad (VII-36)$$

Bilan

Les trois expressions précédentes ((VII-30), (VII-33), (VII-36)) définissent les rendements solaires maximaux et les rendements exergetiques des procédés de conversion hybride (PVT), photovoltaïque (PV) et thermodynamique (T). On retrouve ainsi une analyse analogue à celle présentée sur la Figure 131 en début du chapitre : l'efficacité de la conversion peut s'exprimer comme le produit d'une efficacité réversible et d'un rendement exergetique inférieur à 1. La Table 40 présente l'expression de ces deux facteurs pour chacun des procédés envisagés.

Table 40 : Rendements de conversion réversible et irréversible des systèmes hybride, photovoltaïque et thermique

	Hybride (PVT)	Photovoltaïque (PV)	Thermodynamique (T)	
Rendement solaire réversible	$\eta_{PVT}^* = \frac{j_{ex}(T_a)}{j_{sun}}$	$\eta_{PV}^* = \frac{j_{ex}(T_a) - j_e(T_a) \theta_a}{j_{sun}(1 - \theta_a)}$	$\eta_T^* = \frac{j_e(T_a) \theta_a}{j_{sun}}$	(VII-37)
Rendement exergetique	$1 - \frac{ex_d}{j'_{ex}(T)}$	$1 - \frac{ex_{d,a}}{j_{ex}(T_a) - j_e \theta_a}$	$1 - \frac{ex_{d,T}}{j_q \theta_a}$	(VII-38)

Les trois rendements solaires maximaux η^* correspondent à :

- l'association d'une cellule photovoltaïque réversible ($ex_{d,a} = 0$) et d'un convertisseur thermomécanique réversible ($ex_{d,T} = 0$) pour le convertisseur PVT.
- une cellule photovoltaïque réversible ($ex_{d,a} = 0$) pour le convertisseur PV.
- un convertisseur thermomécanique réversible ($ex_{d,T} = 0$) pour le convertisseur T.

Comme dans le cas des procédés de conversion thermique, ils ne dépendent que de la température et des propriétés optiques de l'absorbeur (H_a , B_a) dès lors que le dispositif de concentration/absorption (H_{sun} , B_{sun}) et l'environnement (H_0 , B_0) sont fixés.

Les expressions ((VII-38)) montrent également que les convertisseurs n'utilisent pas la même source exergetique². En d'autres termes, suivant la technologie impliquée (PVT, PV ou T), le procédé de conversion soumis aux mêmes contraintes extérieures (système de captation-concentration identique et même environnement à T_0) n'a pas accès à la même ressource exergetique disponible :

- j_{ex} pour les procédés hybrides (PVT).
- $j_e \theta_a$ pour les procédés thermodynamiques (T).
- $j_{ex} - j_e \theta_a$ pour les procédés photovoltaïques (PV).

² Cf. l'expression des rendements exergetiques, qui sont, par définition égaux à $1 - ex_d/ex_{source}$.

Pour l'optimisation des systèmes optiques de captation, concentration et absorption, ceci conduit à des stratégies différentes, puisque qu'il s'agira de maximiser le flux radiatif net utilisable par le procédé : j_{ex} , $j_e \theta_a$, ou $(j_{ex} - j_e \theta_a)$.

IV. Performances maximales des convertisseurs solaires

L'hypothèse de corps noirs pour tous les émetteurs (soleil, environnement et absorbeur) permet d'obtenir une expression analytique des trois rendements réversibles définis précédemment. Etant donné que cette hypothèse est largement utilisée dans la littérature, elle permettra, dans un premier temps de comparer nos résultats avec ceux publiés, et de présenter, plus simplement, certains résultats. Dans un deuxième temps, l'impact de l'atmosphère et des propriétés optiques de l'absorbeur seront analysés.

4.1. Corps noir

Tous les émetteurs sont considérés comme des corps noirs (voir §2.1, p.239) caractérisés par leur température :

- le Soleil à $T_{sun} = 5800K$,
- l'environnement à $T_0 = 300 K$
- l'absorbeur à T_a .

D'après les équations ((VII-10), (VII-11)), les irradiances énergétique et exergétique s'expriment comme suit.

$$\int_0^{+\infty} H_k(\lambda) d\lambda = \sigma_B T_k^4 \quad (VII-39)$$

$$\int_0^{+\infty} B_k(\lambda) d\lambda = \sigma_B T_k^4 \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_k}\right) \quad (VII-40)$$

Par suite, les densités de flux net énergétique et exergétique s'écrivent, d'après les équations ((VII-20) et ((VII-24) :

$$j_e(T_a) = \sigma_B \{ [f_{sun} T_{sun}^4 + (1 - f_{sun}) T_0^4] - T_a^4 \} \quad (VII-41)$$

$$j_{ex}(T_a) = \sigma_B \left\{ \left[f_{sun} T_{sun}^4 \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_{sun}}\right) + (1 - f_{sun}) T_0^4 \left(-\frac{1}{3}\right) \right] - T_a^4 \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_a}\right) \right\} \quad (VII-42)$$

Le flux solaire incident s'exprime quant à lui par :

$$j_{sun} = \sigma_B f_{sun} T_{sun}^4 \quad (VII-43)$$

Les équations ((VII-41)), ((VII-43)) permettent d'exprimer les différents rendements solaires maximaux en fonction des trois températures T_{sun} , T_0 et T_a sous la forme [217] :

$$\eta_{PVT}^* = 1 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_{sun}} - \frac{1 - f_{sun}}{3 f_{sun}} \frac{T_0^4}{T_{sun}^4} - \frac{1}{f_{sun}} \frac{T_a^4}{T_{sun}^4} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_a} \right) \quad (VII-44)$$

$$\eta_{PV}^* = \frac{T_0}{T_a} - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_{sun}} + \frac{1 - f_{sun}}{f_{sun}} \frac{T_0^4}{T_{sun}^4} \left(-\frac{4}{3} + \frac{T_0}{T_a} \right) + \frac{1}{3 f_{sun}} \frac{T_a^4}{T_{sun}^4} \left(\frac{T_0}{T_a} \right) \quad (VII-45)$$

$$\eta_T^* = \left[1 + \frac{1 - f_{sun}}{f_{sun}} \frac{T_0^4}{T_{sun}^4} - \frac{1}{f_{sun}} \frac{T_a^4}{T_{sun}^4} \right] \left(1 - \frac{T_0}{T_a} \right) \quad (VII-46)$$

On peut montrer [217] qu'il existe une température optimale T_a^* maximisant les rendements solaires réversibles. Pour les convertisseurs PVT et PV, la température optimale de fonctionnement est égale à la température de l'environnement T_0 . Dans ce cas, les expressions ((VII-44)) et ((VII-45)) montrent que les deux rendements η_{PVT}^* et η_{PV}^* convergent vers l'expression issue des travaux de Petela [209]:

$$\lim_{T_a \rightarrow T_0} (\eta_{PVT}^*) = 1 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T_{sun}} + \frac{1}{3} \frac{T_0^4}{T_{sun}^4} = \eta_{Petela} \quad (VII-47)$$

Pour les convertisseurs thermodynamiques, la Figure 133 présente l'évolution du rendement solaire maximal des pour des facteurs de concentration de 10, 30 et 100. Il existe également une température optimum T_a^* , vérifiant :

$$\frac{\partial \eta_T^*}{\partial T_a} = 0 \quad (VII-48)$$

Cette équation n'a pas de solution analytique (équation polynomiale de degré 5 [217]), mais peut être résolue facilement par un solveur numérique.

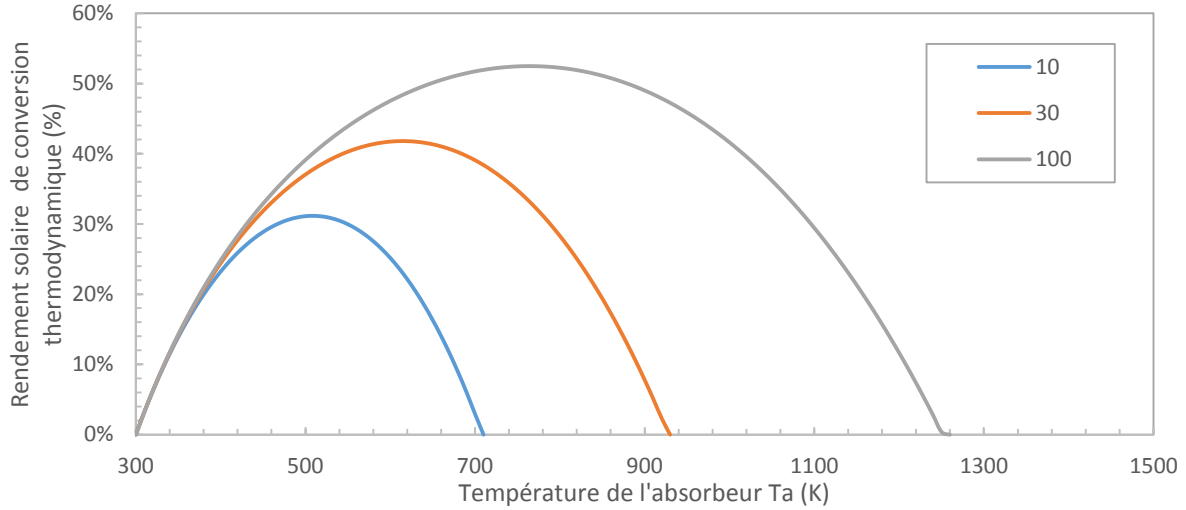


Figure 133 : Rendement solaire des convertisseurs thermodynamiques réversibles en fonction de la température de l'absorbeur. Tous les émetteurs sont considérés comme des corps noirs à $T_s = 5800 \text{ K}$ (soleil), $T_0 = 300 \text{ K}$ (environnement) et T_a (absorbeur).

Nous pouvons également remarquer que le rendement solaire η_T^* tend vers l'expression proposée par Steinfeld [213], lorsque f_{sun} est petit. En effet,

$$\lim_{f \rightarrow 0}(\eta_T^*) = \left[1 - \frac{T_a^4 - T_0^4}{f_{sun} T_{sun}^4} \right] \left(1 - \frac{T_0}{T_a} \right) \quad (\text{VII-49})$$

qui peut s'écrire, en remarquant que le produit $C \text{ DNI} = f_{sun} \sigma_B (T_{sun})^4$:

$$\lim_{f \rightarrow 0}(\eta_T^*) = \left[1 - \frac{\sigma_B (T_a^4 - T_0^4)}{C \text{ DNI}} \right] \left(1 - \frac{T_0}{T_a} \right) = \eta_{Steinfeld} \quad (\text{VII-50})$$

Dans son analyse, Steinfeld [213] considère que l'absorbeur perçoit l'environnement sous un angle solide égal à π (la $\frac{1}{2}$ sphère), c'est-à-dire un facteur de forme $f_0 = 1$. Ceci conduit à une valeur supérieure du rendement pour l'analyse de Steinfeld, comme le montre l'équation ((VII-51), issue de ((VII-46), (VII-50)) :

$$\eta_{Steinfeld} = \eta_T^* + \frac{T_0^4}{T_{sun}^4} \left(1 - \frac{T_0}{T_a} \right) \quad (\text{VII-51})$$

La prise en compte de $f_0 = 1$ ou $f_0 = 1 - f_{sun}$ reste d'ailleurs un sujet de discussion dans la communauté CSP. Cependant, remarquons que la différence entre les deux analyses n'a aucun impact dans un objectif d'ingénierie, puisque le dernier terme de ((VII-51) est très faible :

$$(T_0/T_{sun})^4 \approx 7,1 \cdot 10^{-6}, \text{ pour } T_0 = 300 \text{ K}, T_{sun} = 5800 \text{ K} \text{ et } 1 - T_0/T_a < 1.$$

Dans la suite, nous garderons les expressions ((VII-37) pour les rendements solaires, c'est-à-dire un facteur de forme $f_0 = 1 - f_{sun}$ défini par l'équation ((VII-13), puisque cette dernière

hypothèse conduit à des expressions permettant de traiter les résultats de la littérature [213], [218], [219] comme des cas particuliers ($T \rightarrow T_0$ ou $f_{sun} \rightarrow 0$), d'une analyse plus générale :

$$\eta_{Petela} = \lim_{T_a \rightarrow T_0} (\eta_{PVT}^*) \quad \eta_{Steinfeld} = \lim_{f \rightarrow 0} (\eta_T^*) \quad (VII-52)$$

4.2. Rendements maximaux sous spectre solaire réel

L'évaluation des rendements solaires maximaux accessibles via le rayonnement solaire reçu au sol nécessite la connaissance de l'irradiance monochromatique du disque solaire, « vue » de la surface, puis la détermination des densités de flux net énergétique j_e et exergetique j_{ex} .

Irradiances monochromatiques du disque solaire

L'irradiance énergétique spectrale reçue au sol, ($dj_e/d\lambda$ en $W.m^{-2}nm^{-1}$) est disponible par mesure ou par modélisation. Dans ce paragraphe nous utiliserons le spectre solaire de référence ASTM G173-03 DC ou tout autre spectre solaire modélisé avec SMARTS [86], [81], décrit dans le chapitre II, §2.2 p.70.

On en déduit la luminance monochromatique et l'irradiance monochromatique énergétique du disque solaire :

$$\frac{dj_e}{d\lambda} = K_{sun}(\lambda) \Omega_s \Rightarrow K_{sun}(\lambda) = \frac{1}{\Omega_s} \frac{dj_e}{d\lambda} \quad (VII-53)$$

$$H_{sun}(\lambda) = \frac{\pi}{\Omega_s} \frac{dj_e}{d\lambda} \quad (VII-54)$$

A partir de la luminance énergétique monochromatique ($H(\lambda)$), on peut calculer la luminance entropique monochromatique ($L(\lambda)$) d'après les équations ((VII-4) et ((VII-5).

$$L_{sun}(\lambda) = \frac{2kc^2}{\lambda^4} \{ [1 + X_{sun}(\lambda)] \ln[1 + X_{sun}(\lambda)] - X_{sun}(\lambda) \ln[X_{sun}(\lambda)] \} \quad (VII-55)$$

$$\text{Avec } X_{sun}(\lambda) = \frac{\lambda^5 K_{sun}(\lambda)}{2hc^2} \quad (VII-56)$$

Puis l'irradiance entropique monochromatique :

$$I_{sun}(\lambda) = \pi L_{sun}(\lambda) \quad (VII-57)$$

Et l'irradiance (W/m^2) exergetique monochromatique du disque solaire :

$$B_{sun}(\lambda) = H_{sun}(\lambda) - T_0 L_{sun}(\lambda) \quad (VII-58)$$

Densités de flux net monochromatiques

Soit H_{net} et B_{net} , les densités de flux net monochromatique, en W/m^3 , déduites des expressions ((VII-20), (VII-24).

$$H_{net}(\lambda, T_a) = [1 - \rho(\lambda)][f_{sun} H_{sun}(\lambda) + (1 - f_{sun}) H_0(\lambda, T_0)] - H_a(\lambda, T_a) \quad (VII-59)$$

$$B_{net}(\lambda, T_a) = [1 - \rho(\lambda)][f_{sun} B_{sun}(\lambda) + (1 - f_{sun}) B_0(\lambda, T_0)] - B_a(\lambda, T_a) \quad (VII-60)$$

L'intégration des expressions ((VII-59), (VII-60)) permet de déterminer les densités de flux nets j_e et j_{ex} (équations ((VII-20), (VII-24))). Dans un premier temps, nous avons déterminé les rendements maximaux donnés par les expressions ((VII-37)).

Rendement maximal des convertisseurs PVT

La Figure 134 présente l'évolution du rendement solaire maximal des convertisseurs (PVT) calculé d'après l'expression ((VII-37)), selon que la surface absorbante soit noire ($\alpha = \varepsilon = 1$), grise (ici $\alpha = \varepsilon = 0,9$) ou sélective ($\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda)$). Pour comparer nos résultats à la littérature, nous avons utilisé une température ambiante $T_0 = 288,1$ K [220]. Cette température est conservée dans la suite.

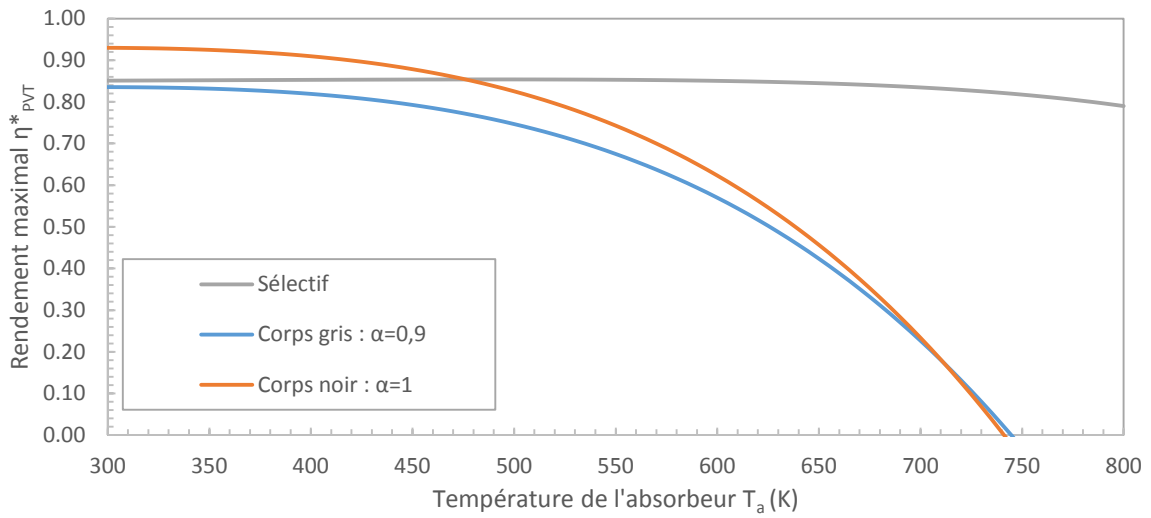


Figure 134 : Rendement solaire maximal d'un convertisseur PVT, pour une surface irradiée noire, grise ($\alpha = 0,9$), ou sélective à $T_0 = 288,1$ K sous spectre solaire ASTM G173-03 DC avec un taux de concentration de 10

Comme dans le cas précédent, la température optimale de la surface est la température de l'environnement T_0 , quel que soit la nature du corps. Nous en déduisons que le meilleur système PVT présente une surface noire maintenue à la température T_0 . C'est donc un système PV, puisque dans ce cas, la chaleur j_q n'est pas valorisable.

Dans ces conditions optimales, $\rho = 0$, $H_a = H_0$, $B_a = B_0$, l'expression des densités de flux net monochromatiques se simplifie en :

$$H_{net}(\lambda, T_0) = f_{sun} (H_{sun}(\lambda) - H_0(\lambda, T_0)) \quad (VII-61)$$

$$B_{net}(\lambda, T_0) = f_{sun} (B_{sun}(\lambda) - B_0(\lambda, T_0)) \quad (VII-62)$$

Rappelons que B_{net} représente la valeur maximale du travail qui peut être produit par une surface irradiée unitaire, pour la longueur d'onde comprise entre λ et $\lambda + d\lambda$. On retrouve les expressions utilisées par plusieurs auteurs pour l'évaluation de l'exergie radiative ([209], [220]).

Exergie du spectre solaire

La Figure 135 présente l'évolution de H_{net} et B_{net} en fonction de la longueur d'onde. Cette approche du calcul de l'exergie associée à un spectre solaire est confirmée par la bibliographie [220].

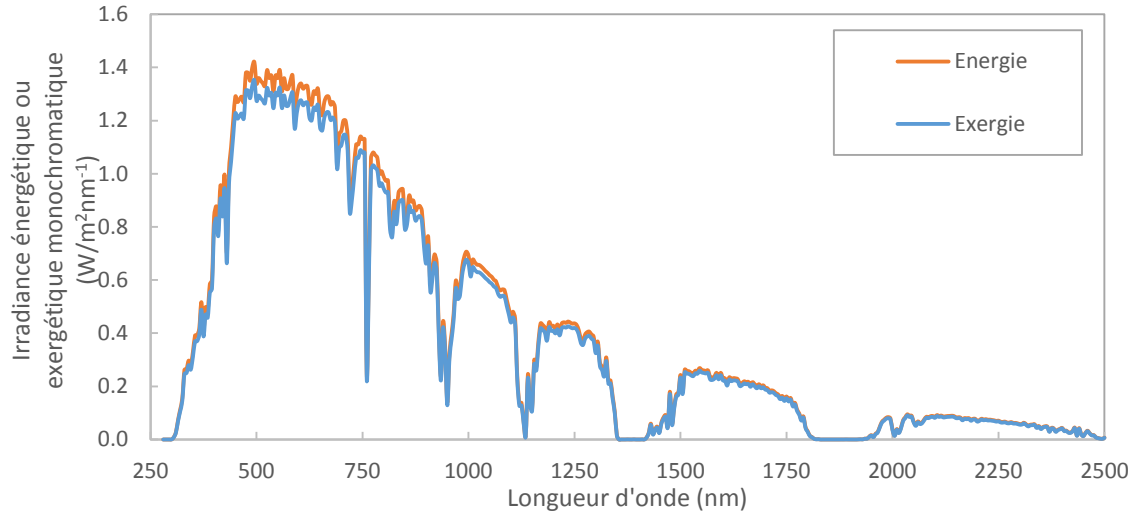


Figure 135 : Densité de flux net monochromatique reçue par une surface noir à $T_0 = 288,1$ K. Spectre ASTM G173-03 DC

Facteur de qualité des spectres solaires

Nous définissons le facteur de qualité du spectre solaire comme le rapport des densités de flux nets exergétique et énergétique. Ce facteur de qualité représente la fraction de l'énergie mécanisable associé au spectre solaire.

$$\Theta = \frac{J_{ex}}{J_e} \quad (\text{VII-63})$$

Spectres solaires ASTM G173-03

Les spectres solaires ASTM G173-03 sont les spectres solaires de référence mondiale, utilisés dans de nombreuses normes et l'ensemble des publications. Ils sont modélisés à l'aide de SMARTS [81] (voir chapitres II et III) qui permet l'évaluation du spectre solaire Direct et Circumsolaire (DC), du spectre global (GT) et du spectre solaire extraterrestre (Etr).

La Table 41 présente pour ces trois spectres, les densités de flux nets exergétique et énergétique reçus par une surface noire supposée à la température de l'environnement (conditions optimales pour un système PV). Est indiquée également la transmittance atmosphérique ($T_{e,atm}$) qui correspond au rapport des densités de flux énergétiques du spectre solaire (DC ou GT) et du spectre extraterrestre.

$$T_{e,atm} = \frac{j_{e,DC}}{j_{e,Etr}} \quad (\text{VII-64})$$

Table 41 : Densité de flux net énergétique, transmittance atmosphérique et facteurs de qualité des spectres solaires ASTM G173-03

	Etr	GT	DC
Densité de flux net énergétique	1348,8	1001,1	900,1
Densité de flux net exergetique	1260,0	932,7	837,7
Facteur de qualité	93,4%	93,2%	93,1%
Transmittance atmosphérique ($T_{e,atm}$)	-	74,3 %	66,3 %

Ces grandeurs signifient qu'un collecteur installé sur Terre ayant un rendement de captation de 100% (soit aucune perte d'énergie collectée) pourrait convertir en travail un maximum de 93,2% ou de 93,1% du rayonnement énergétique incident, en fonction de l'emploi ou non d'un système à concentration.

Le résultat obtenu montre que l'énergie solaire reste une ressource de haute qualité, c'est-à-dire avec une partie mécanisable proche de l'unité, même après la traversée de l'atmosphère. On peut également définir un facteur de qualité spectrale (Θ_λ). C'est le rapport entre les densités de flux net monochromatique énergétique et exergetique :

$$\Theta_\lambda = \frac{B_{net}}{H_{net}} \quad (\text{VII-65})$$

Le but est d'observer le facteur de qualité à chaque longueur d'onde, illustré par la Figure 136 sur un domaine de 250 à 2500 nm pour faciliter la lecture.

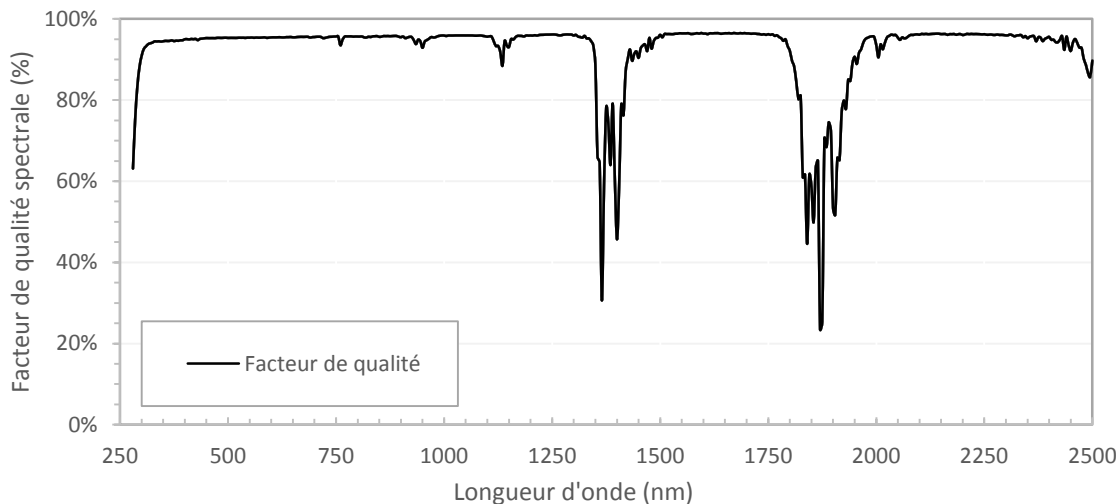


Figure 136 : Facteur de qualité spectrale selon le spectre ASTM G173-03 DC

Nous observons que la qualité du spectre solaire reste proche de 95%, excepté dans les zones de forte absorption de l'atmosphère. Ces pics d'absorption, principalement dus à la vapeur d'eau (voir chapitre II, Figure 26, p.69) dégradent simultanément l'énergie et la qualité du spectre solaire. De même on observe que les UV (280 à 320 nm), absorbés par l'ozone, présentent également un facteur de qualité plus faible. Cependant, l'évaluation du facteur de qualité spectral à ces longueurs d'onde est sujette à beaucoup d'incertitudes, du fait des faibles valeurs de H_{net} pour les pics d'absorption.

Impact de l'atmosphère locale

L'atmosphère de référence utilisée pour modéliser les spectres ASTM G173-03 sur SMARTS est l'US Standard Atmosphere [81]. Elle est obtenue par des moyennes des conditions météorologiques sur 15 états des Etats-Unis. Cette atmosphère peut être vue comme un filtre avec une transmittance spectrale qui permet de passer du spectre solaire extraterrestre (Etr) à un spectre solaire au sol, illustré par la Figure 137 pour le spectre au sol Direct et Circumsolaire (DC).

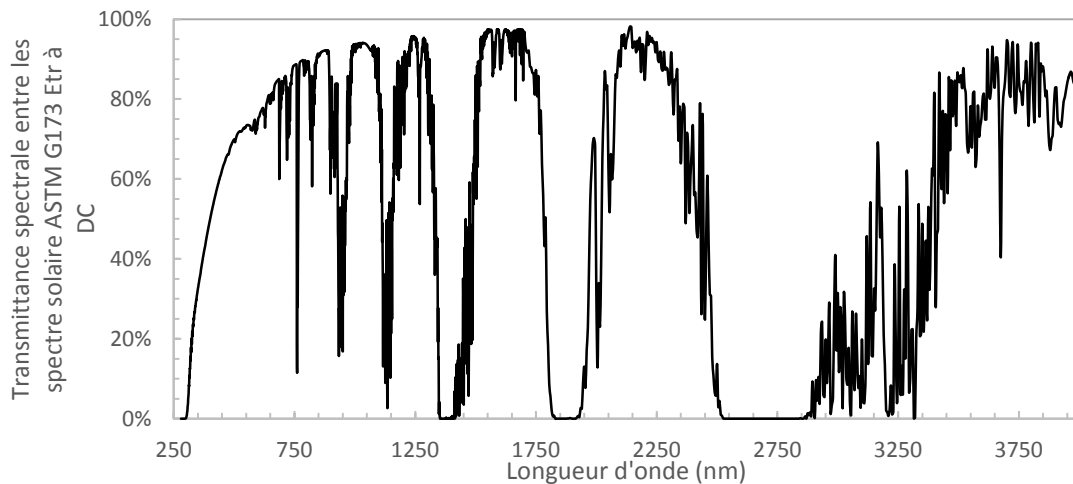


Figure 137 : Transmittance de l'atmosphère correspondant au passage du spectre solaire ASTM G173-03 Etr à DC

Nous avons calculé le facteur de qualité des spectres locaux modélisés dans le chapitre III (Figure 41 p.102) et utilisés dans l'ensemble du manuscrit. Les résultats sont présentés dans la Table 42. Malgré une irradiance spectrale différente due par exemple à la vapeur d'eau, à l'altitude ou au facteur Air-Mass, chaque spectre solaire a un facteur de qualité proche de celui du spectre solaire ASTM G173-03 DC (93,07%), ici abrégé ASTM. Nous remarquons toutefois que le facteur de qualité semble augmenter avec l'irradiance reçue au sol.

Table 42 : Irradiance énergétique et facteur de qualité des spectres solaires locaux

	ASTM	Paranal	Sandia	Montsec	Ouarzazate	Brisbane	Mezaira
Irradiance énergétique (W/m ²)	900	1040	1014	961	958	920	828
T _{atm,e} (-)	66,77%	77,15%	75,22%	71,29%	71,07%	68,25%	61,42%
Altitude (m)	-	2154	1662	1574	1136	45	204
Vapeur d'eau (atm/cm)	1,42	0,245	0,398	0,495	0,853	1,226	1,676
Θ (%)	93,07%	93,19%	93,19%	93,14%	93,11 %	93,10%	92,91%

Rendement maximal des convertisseurs thermodynamiques

La Figure 138 présente l'évolution du rendement solaire maximal des convertisseurs thermodynamiques (T) calculé d'après l'expression ((VII-37), selon que la surface absorbante soit noire, grise ou sélective. La surface sélective est identique à celle présentée précédemment.

Là encore, il existe une température optimale comprise entre T_0 et la température de stagnation, quel que soit le type de surface. On remarque également l'intérêt d'une surface sélective par rapport à une surface grise qui, en plus d'accroître la densité de flux net

énergétique j_e , augmente également la température optimale de fonctionnement, et par suite l'exergie thermique disponible pour le convertisseur thermomécanique ($j_e \theta_a$).

En conséquence, et contrairement au cas des convertisseurs PV, l'utilisation d'une surface sélective peut amener à des rendements supérieurs à ceux que l'on obtiendrait théoriquement avec une surface noire.

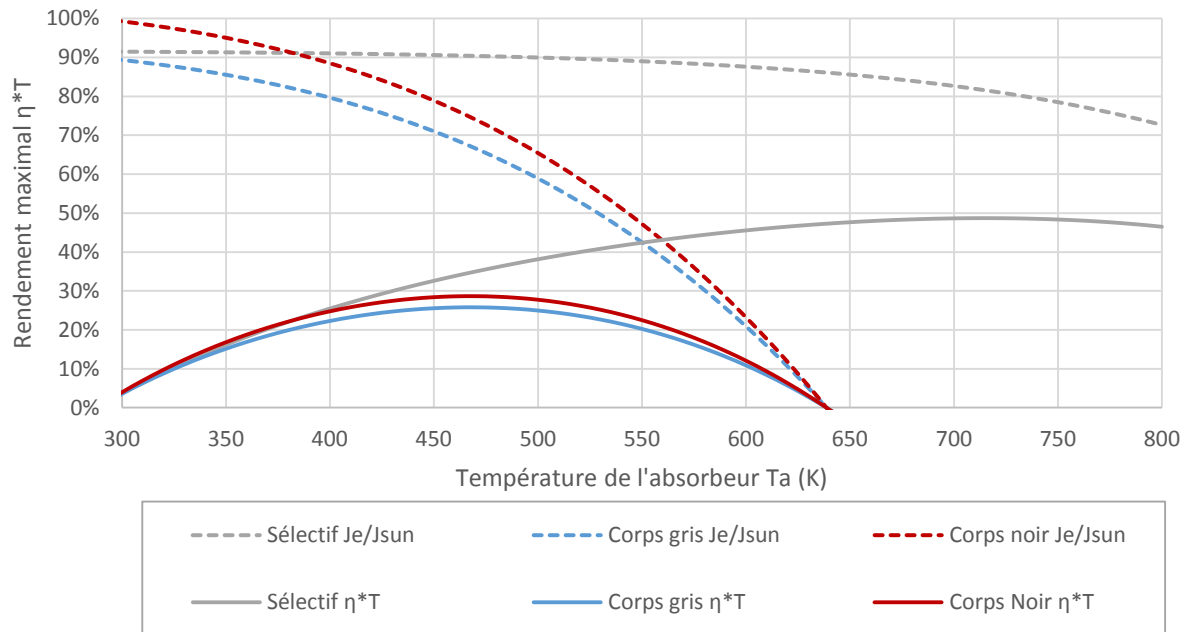


Figure 138 : Rendement solaire maximal d'un convertisseur thermomécanique, pour une surface irradiée noire, grise ($\alpha = 0,9$) ou sélective, à $T_0 = 288,1$ K sous spectre solaire ASTM G173-3 DC avec un taux de concentration de 10

V. Conclusion du chapitre VII

Dans ce chapitre, nous avons démontré plusieurs points importants et conforté nos connaissances sur les mécanismes de conversion de l'énergie solaire concentrée.

Tout d'abord, la définition des rendements de conversion solaire réversible, permet de quantifier, pour n'importe quel spectre solaire, les performances maximales que l'on peut attendre des trois systèmes de conversion de l'énergie solaire (PVT, PV, T).

L'analyse de différents spectres solaires montre tout d'abord que le facteur de qualité de l'énergie solaire reste toujours très proche de 0,93 ; valeur également obtenue dans l'hypothèse d'un corps noir à 5800 K.

Pour la conversion PV, le convertisseur idéal correspond à une surface noire maintenue à une température aussi proche que possible de celle de l'environnement. Les convertisseurs PVT auront toujours des performances maximales inférieures à celles de ce convertisseur idéal PV.

L'intérêt de cette technologie dépendra donc des rendements exergetiques que l'on peut obtenir d'une part, pour la conversion PV, et d'autre part, pour la conversion thermodynamique.

Pour les convertisseurs thermodynamiques, les surfaces sélectives permettent à la fois d'augmenter le flux net d'énergie absorbée, et la température optimale de fonctionnement. On peut alors obtenir des rendements maximaux supérieurs à ceux accessibles à une surface noire. L'optimisation du flux net énergétique effectuée dans les chapitres précédents permet donc de facto d'accroître le rendement maximal du convertisseur thermodynamique.

Enfin, l'hypothèse d'un corps noir pour le disque solaire a permis de retrouver certains résultats de la littérature, qui apparaissent comme des cas limites du modèle plus général développé ici. Soulignons en outre, que l'approche suivie ne requiert pas de définir un « état mort » pour le rayonnement, comme le nécessite l'approche de Petela [209].

En conclusion, nous avons identifié l'approche à respecter pour l'analyse et l'optimisation d'un convertisseur thermodynamique ; exprimé dans l'équation (VII-37) de la Table 40. Cette démarche consiste à maximiser le produit de l'énergie thermique disponible sur l'absorbeur solaire et du facteur de Carnot $(1 - T_0/T_a)$ relatif à la température de l'absorbeur. Il s'agit de la démarche adoptée dans le chapitre VI où nous cherchions à maximiser l'énergie solaire disponible par chaque interface. Pour la conversion de l'énergie radiative en travail les traitements spectralement sélectifs sont d'une aide précieuse, car ils permettent d'augmenter la fois l'énergie thermique disponible et la température optimale de fonctionnement.

Conclusion générale

Durant cette thèse, nous avons tout d'abord identifié dans le **chapitre I** le fort potentiel des centrales solaires à concentration dans la réduction des émissions carbonées mondiales pour la production électrique. L'atout principal de ces centrales est d'intégrer des stockages de grande capacité contrairement aux centrales photovoltaïques, ce qui permet leur fonctionnement hors ensoleillement. Dans la pratique, le déploiement des centrales solaires à concentration est en partie freiné par le lourd investissement que représentent les vastes et coûteux champs solaires nécessaires, de l'ordre de $10\,000\text{ m}^2$ de collecteurs par $\text{MW}_{\text{électrique}}$ produit ; pour une centrale incluant un stockage thermique de 7,5h. Ainsi, si une partie du champ solaire servira à alimenter le stockage thermique il n'en reste pas moins nécessaire d'augmenter ses performances et de diminuer les coûts. Cet ensemble de collecteurs solaires, constitués de miroirs, vitres et absorbeurs thermiques revêtus d'empilements de couches minces fonctionnelles, représente également le premier poste de pertes de rendement dans la conversion globale du rayonnement solaire en électricité. Compte tenu du lien direct entre chaleur collectée et production électrique, nous avons donc cherché dans ce travail des possibilités d'augmentation des performances de ces collecteurs. Pour cela, nous nous sommes concentrés successivement sur chaque type d'élément présent dans un collecteur solaire : surfaces réfléchissantes, transparentes et absorbantes. Les études et l'amélioration des performances envisagées nécessitent deux outils de travail principaux.

Les outils développés

Pour calculer les performances solaires spectrales d'un empilement de couches minces, il est tout d'abord nécessaire de disposer d'un spectre solaire. La première solution est d'une part d'utiliser un spectre solaire de référence mondiale pour le solaire à concentration : l'ASTM G173-03 AM1.5 Direct et Circumsolaire (DC). D'autre part, afin de se rapprocher des conditions réelles auxquelles peuvent être soumises les centrales solaires dans le monde, nous avons à l'aide du logiciel SMARTS-2 généré des spectres solaires issus des conditions climatiques de plusieurs sites, la plupart compatibles avec un usage CSP. Pour cela nous avons utilisé la base de données atmosphériques AERONET et cherché à en tirer des tendances représentatives de chaque site. Le jeu de spectres solaires obtenus avec ce logiciel est notre premier outil pour tenter d'augmenter les performances solaires des collecteurs. Il est en effet nécessaire aux études liées à l'évaluation et à la maximisation des performances solaires de chaque type de surface selon les conditions climatiques locales.

Le deuxième outil que j'ai développé dans cette thèse permet la simulation et la maximisation des performances solaires passant par l'optimisation d'un ensemble de couches minces fonctionnalisant les surfaces réceptrices. À partir des indices de réfraction complexes de matériaux disponibles dans la littérature, notre code modélise le comportement optique de l'empilement par une méthode de matrice de transfert. À l'aide d'une loi de mélange représentative des matériaux composites (modèle de Bruggeman), il est de plus possible de calculer les indices optiques de toute une palette de matériaux à partir des données de la littérature, qu'ils soient composites, rugueux ou poreux (composites entre deux matériaux ou

composites matériau-air). Les variations d'épaisseur ou de composition des couches peuvent également être prises en compte dans le code. Dans un second temps, l'utilisateur peut optimiser les épaisseurs et/ou la composition de chaque couche mince de l'empilement pour maximiser la performance optique de l'ensemble, en utilisant un algorithme stochastique proche des algorithmes génétiques. Cette variante développée par nos soins permet de retrouver pour chaque type de couche mince (réfléchissante, transparente, absorbante, sélective) des résultats fidèles pour un temps de calcul raisonnable. Muni d'une interface utilisateur, ce logiciel est déjà maintenant utilisé en interne au laboratoire PROMES par plusieurs membres de l'équipe PPCM.

Ces outils ont été détaillés dans les **chapitres II et III**.

Etude et optimisation des fonctions principales des collecteurs solaires

Dans le **chapitre IV**, consacré aux couches réfléchissantes pour les miroirs permettant de concentrer l'énergie solaire, nous avons mis en avant plusieurs points clefs. Tout d'abord, les monocouches minces métalliques, et particulièrement celles d'argent et d'aluminium, permettent facilement d'obtenir des réflectances solaires élevées, respectivement de 95,5% et 92,2%. Cependant, ces solutions sont très vite limitées par la qualité optique des métaux déposés, liée à leurs indices de réfraction complexes. Elles doivent également être peu rugueuses (< 5 nm) pour limiter les pertes par réflexion non spéculaire (la réflexion diffuse n'étant pas focalisable vers l'absorbeur). La seule voie prometteuse pour améliorer les performances des couches minces métalliques réfléchissantes est de réaliser un empilement bicouche consistant en une fine couche d'argent (40 nm) déposée sur une couche d'aluminium (≥ 130 nm), ce qui permet de mettre à profit la réflectance spectrale de ces deux métaux (l'aluminium réfléchit mieux les UV tandis que l'argent réfléchit mieux les autres longueurs d'onde). On obtient ainsi des surfaces plus réfléchissantes (95,8%, soit +0,3% par rapport à l'argent seul) ce qui permet des économies de matière (2/3 d'argent en moins).

En intégrant les problématiques de vieillissement et notamment de protection des couches minces métalliques, nous avons identifié quelques limites des miroirs commerciaux actuels. En effet des couches protectrices superficielles en verre ou organiques déposées sur des miroirs réduisent de 1 à 2% la réflectance solaire de ces derniers. Des couches minces protectrices diélectriques telles que le SiO_2 permettent cependant de conserver une réflectance élevée ($\approx 94,5\%$).

Pour augmenter les performances solaires au-delà de celles des métaux seuls, il est nécessaire d'utiliser plusieurs couches minces diélectriques sur un substrat, si possible fortement réflecteur. Ainsi quatre bicouches $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ permettent d'atteindre la réflectance solaire record de 97,6% si elles sont déposées sur argent. Une réflectance solaire de 96% est obtenue pour le même empilement sur aluminium, ce qui fait de cet empilement sur un métal peu coûteux un meilleur réflecteur que l'argent seul (95,5%). À l'aide d'un empilement plus complexe (50 couches de $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) nous avons obtenu une réflectance solaire de 94,6% à partir d'un substrat de verre (4% de réflectance).

Concernant le calcul de la réflectance solaire de plusieurs miroirs en cascade, comme l'on peut en rencontrer dans un collecteur solaire, nous avons mis en avant le gain de précision

apporté par notre méthode de calcul exacte basée sur l'intégration en longueur d'onde du produit des réflectances spectrales de chaque miroir : nous évitons ainsi une erreur de 1,2% pour des miroirs argent, par rapport à une méthode de calcul classique basée sur le produit des réflectances solaires des miroirs (produit des intégrales en longueur d'onde des réflectances spectrales). Pour le choix des matériaux pour deux miroirs, il est préférable d'utiliser des miroirs aux réflectances solaires élevées et si possible constitués des mêmes matériaux. Deux miroirs argent sont par exemple un bon choix.

L'utilisation des spectres solaires locaux montre que la réflectance solaire des miroirs peut varier entre les sites. L'écart d'un site à l'autre peut être plus significatif pour les miroirs argent ($\pm 0,37\%$) mais il est très faible pour les miroirs les plus performants. Cet écart peut être corrélé avec la densité de flux présente dans les UV qui varie en fonction des sites. Il n'est par contre pas possible d'optimiser efficacement la structure de l'empilement pour augmenter la réflectance solaire locale, quel que soit le site.

Dans le **chapitre V**, nous avons inversé notre critère de performance par rapport au chapitre précédent. Nous cherchons en effet cette fois à augmenter la transmittance solaire des verres utilisés comme vitres de protection. Pour cela, il est indispensable de réduire la réflectance naturelle de chaque côté du verre (réflectance par face $\approx 4\%$) grâce à des couches minces antireflet. Nous avons montré que des couches minces poreuses permettent d'obtenir une transmittance solaire totale (deux faces) élevée, de l'ordre de 97,2%, indépendamment du matériau utilisé. A titre de comparaison, les couches minces de matériaux denses ont des performances plus limitées (95,7% pour le MgF_2), à cause de leurs indices de réfraction plus élevés. Le SiO_2 est un très bon candidat pour les couches poreuses, déjà utilisé dans certaines solutions antireflet, puisqu'il est peu coûteux par rapport aux fluorites et que le taux de porosité nécessaire (50%) reste acceptable pour une fabrication aisée et une bonne stabilité mécanique. Cette solution est réellement applicable, car la tolérance sur les incertitudes d'épaisseur et de porosité liées à la fabrication est grande et la rugosité entre les couches peut avoir un effet positif sur les performances. Nous avons également démontré qu'il est possible de protéger superficiellement la couche SiO_2 poreuse par une fine couche de SiO_2 dense sans détériorer les performances optiques de l'ensemble. Cette structure innovante fera prochainement l'objet d'un dépôt de brevet.

Des solutions à plusieurs couches minces poreuses (au-delà de deux) peuvent apporter un gain important de performance (transmittance solaire totale de 98,82% pour deux couches, record de 99,18% pour quatre couches), bien que les porosités nécessaires soient alors élevées (maximum de 70% pour la couche superficielle de l'empilement deux couches, jusqu'à 91% dans le cas du quatre couches). Ces couches restent fabricables, de par la bonne tolérance des performances solaires à la rugosité intercouche et aux erreurs sur l'épaisseur et la porosité lors du dépôt. A contrario les multicouches antireflets constituées de couches denses ne sont pas plus efficaces qu'une simple monocouche.

Pour les applications solaires, la qualité des verres supports ne doit pas être négligée, comme le montre notre étude soumise dans la revue *Solar Energy Materials and Solar Cells*, qui montre le lien direct entre la transmittance solaire totale, l'indice de réfraction du verre et son nombre d'Abbe (variation de l'indice avec la longueur d'onde).

Si l'on prend en compte la réflexion préalable par un miroir dans un collecteur solaire, il est possible d'adapter spécifiquement la couche antireflet de l'interface transparente qui le suit au spectre solaire réfléchi par le miroir, en adaptant son épaisseur. Cela permet par exemple d'augmenter la transmittance solaire d'une vitre avec antireflet de +0,3% si le rayonnement est préalablement réfléchi par deux miroirs argent en cascade. Le gain de transmittance après cette optimisation spécifique devient nul pour les miroirs les plus performants.

Concernant l'impact des conditions climatiques sur les performances des antireflets, nous relevons de faibles différences entre les sites ($\pm 0,1\%$), qui ont tendance à être moins prononcées pour les empilements les plus performants (antireflets poreux multicouches). L'optimisation des couches antireflets selon les spectres locaux ne donne accès qu'à des différences de performances trop faibles pour être techniquement applicables ou utiles. Un antireflet performant est donc optimal partout sur Terre.

Dans le **chapitre VI** consacré aux absorbeurs spectralement sélectifs (forte absorption solaire, faible émission infrarouge), nous avons premièrement démontré les bénéfices que ce type de surface peut apporter en termes de rendement héliothermique (conversion solaire-chaleur), notamment pour les systèmes à faible taux de concentration. Un traitement sélectif minimise en effet les pertes thermiques radiatives, ce qui permet d'atteindre des températures d'absorbeur supérieures, et donc de meilleurs rendements de conversion thermodynamique de la chaleur en travail puis en électricité. Les propriétés sélectives ne peuvent être obtenues que grâce à plusieurs couches minces de matériaux différents : diélectrique, métal et/ou composite.

Nous avons établi trois modes de fonctionnement pour ces empilements, en fonction des couples de conditions opératoires facteur de concentration/température. Ces modes délimitent trois zones où le comportement du traitement sélectif est différent : maximisation de l'absorptance solaire, compromis absorptance/émittance ou minimisation de l'émittance. L'impact du couple concentration/température sur les performances se retrouve dans toute notre étude. Ainsi, la nature des matériaux et le nombre de couches de l'empilement optimaux varient en fonction des conditions d'utilisation. L'optimisation d'un traitement sélectif passe donc par une bonne connaissance de la concentration et de la température auxquels il sera soumis.

En utilisant notre algorithme d'optimisation, nous avons testé différents empilements utilisant des combinaisons de couches minces métalliques, diélectriques et composites métal-diélectrique (cermet) de nombreux matériaux existants. Les matériaux composites métal-diélectrique figurent dans les trois types d'empilements les plus performants (gradient de cermets, alternances métal/cermet, alternances cermet/diélectrique). Des empilements de quatre à six couches sont à privilégier, offrant un compromis entre absorptance solaire élevée et émittance corps noir limité, les deux grandeurs augmentant avec le nombre de couches. Les couches antireflet ont également un rôle important à jouer dans ces empilements, puisqu'une optimisation de ces dernières permet d'accroître l'absorptance solaire, ce qui augmente le rendement héliothermique, parfois de façon significative (+2%).

Malgré une apparente complexité, les empilements spectralement sélectifs peuvent être fabriqués, grâce à une bonne tolérance aux défauts et erreurs expérimentaux, comme la rugosité et l'incertitude sur l'épaisseur ou la composition déposées. Toutefois certaines couches doivent

être contrôlées plus finement, comme les interfaces métal/diélectrique et les très fines couches métalliques (< 10 nm) dans les empilements complexes.

Placés en bout de chaîne de la conversion du rayonnement solaire en chaleur, les absorbeurs thermiques reçoivent un spectre solaire plus fortement impacté par les interfaces placées en amont (miroir(s) et vitre(s)). Les performances des absorbeurs varient donc selon les performances des surfaces optiques rencontrées au préalable. Nous avons constaté qu'intercaler un ou des miroir(s) argent et/ou un verre avec antireflet SiO_2 poreux modifie peu le rendement héliothermique du revêtement sélectif, de l'ordre de $\pm 0,2$ à $0,3\%$. La réflexion préalable sur un miroir particulier altérant beaucoup le spectre solaire incident (par exemple 3M[®] PV/CSP) nécessite par contre une optimisation spécifique du traitement sélectif de l'absorbeur placé en aval pour maximiser le rendement héliothermique.

Enfin, si le rendement héliothermique peut évoluer en fonction du lieu d'installation ($\pm 1\%$), il est possible d'en tirer parti simplement en pondérant le taux de concentration pour accroître les performances. De même, nous observons que plus un traitement optimisé pour le spectre de référence a un rendement héliothermique élevé, moins les différences de rendement d'un site à l'autre seront importantes.

Bilan sur l'intérêt d'utiliser un spectre solaire autre que l'ASTM G173-03 DC

Dans cette thèse nous avons utilisé pour nos études et nos optimisations des spectres solaires différents de celui de référence mondiale, l'ASTM G173-03 DC. Ces spectres sont soit des spectres solaires modélisés issus de conditions climatiques locales, soit des spectres solaires modifiés pour tenir compte de leurs altérations progressives dans un collecteur solaire par les surfaces placées en amont de celle étudiée. Nous synthétisons ici nos résultats et proposons nos recommandations.

Compte tenu des faibles différences obtenues pour les grandeurs spectrales étudiées (réflectance, transmittance ou absorptance spectrales), nous n'avons pas, sauf exception, représenté graphiquement la modification du spectre solaire étape par étape dans un collecteur solaire. En effet, en particulier si les divers éléments du collecteur sont très performants, les spectres solaires correspondants sont visuellement confondus. Dans presque tous les cas étudiés, nous avons obtenu des augmentations de performance plus significatives en adaptant les matériaux et le nombre de couches minces ou en optimisant leurs épaisseurs, qu'en adaptant l'empilement à un spectre solaire précis, qu'il soit modifié étape par étape au sein du collecteur, ou issu des conditions locales. Pour les miroirs et les vitres, nous avons observé des différences de performances selon le site considéré, mais celles-ci ne peuvent être compensées que difficilement par une optimisation spécifique des surfaces, le même empilement optimal étant trouvé pour le spectre solaire de référence et le spectre solaire local. Des différences de performances et de composition apparaissent pour les traitements sélectifs, mais celles-ci peuvent être compensées en utilisant le spectre solaire de référence et en pondérant le taux de concentration par le rapport entre les irradiances locale et de référence. Les seules différences vraiment marquées concernent l'utilisation d'un miroir 3M[®] PV/CSP. Ce film réfléchissant destiné à des collecteurs hybrides PV/CSP a une réflectance spectrale très particulière, puisqu'il est réfléchissant (280-700 nm) vers l'absorbeur thermique, transparent (700-1000 nm) vers des

cellules PV puis de nouveau réfléchissant (1000-2500 nm). Dans ce cas précis, les traitements de surface peuvent et doivent être adaptés en conséquence.

Concernant le domaine du solaire à concentration uniquement thermique, nous concluons qu'utiliser le spectre solaire ASTM G173-03 DC pour l'estimation et la maximisation des performances solaires est une méthode satisfaisante en première approche. L'augmentation possible des performances des collecteurs passera prioritairement par le recours à des empilements de couches minces plus adaptés que ceux existants.

Vision exergetique : rendement de conversion maximum d'un collecteur solaire

Dans le **chapitre VII**, nous avons conduit une étude théorique sur l'exergie solaire. L'exergie représente la part utile de l'énergie, sa qualité, c'est-à-dire la part valorisable de l'énergie en travail mécanique d'une source d'énergie ici présente sous forme radiative. Cet outil d'analyse thermodynamique a permis dans de nombreux autres domaines associés à l'énergie solaire (production de froid, de chaleur, électrique par cycle thermodynamique) d'augmenter leurs efficacités par une meilleure compréhension des mécanismes de valorisation de l'énergie. Pourtant l'exergie radiative reste peu étudiée. Nous avons donc mis au point une méthode d'analyse en flux net radiatif qui permet d'éviter de définir une problématique « état mort ». Cette méthode a permis la généralisation de plusieurs théories de modélisations présentes dans la littérature, à l'aide d'une unique formule à partir de laquelle on retrouve les diverses expressions de la littérature. Nous avons également démontré que le meilleur convertisseur d'énergie solaire en travail est un corps noir à température ambiante. Finalement, dans notre domaine d'application nous avons validé l'approche énergétique jusqu'au préalable effectuée ; l'approche exergetique donnant un regard différent, mais menant à des conclusions identiques. En conséquence, un collecteur/convertisseur solaire thermique doit bien être optimisé selon l'énergie présente sous forme de chaleur dans le fluide caloporteur. L'absorbeur doit bien être recouvert d'un traitement sélectif qui permet à la fois de maximiser la quantité de chaleur, mais également sa qualité en permettant un fonctionnement optimal à des températures supérieures.

Valorisation des résultats par l'exemple : le cas d'Andasol-1

Pour conclure nos travaux et les illustrer par l'exemple, nous proposons un calcul démonstratif donnant un ordre de grandeur du gain de production envisageable dans une centrale solaire, si l'on employait les différentes surfaces solaires proposées ici. Notre exemple se basera sur la centrale Andasol 1 à Aldeire en Espagne, qui reçoit une irradiance solaire annuelle de 2136 kWh/m²/an. Cette centrale utilise 510 000 m² de collecteurs cylindro-paraboliques pour produire annuellement 158 GWh d'électricité (correspondant à la consommation annuelle d'environ 33 800 foyers français) vendue au prix de 0,27 €/kWh_e, pour un coût d'installation initial de 310 millions d'euro. Les collecteurs solaires utilisés sont constitués d'une structure réfléchissante EuroTrough ET150³ avec des tubes récepteurs sous vide Schott PTR-70 et Solel UVAC. Ces collecteurs permettent de chauffer à 393°C un mélange

³ Le site internet du NREL mentionne des collecteurs « UTE CT Andasol-1 (SKAL-ET) » mais le logiciel SAM du même institut mentionne des « EuroTrough ET150 » dans sa base de données.

de sels fondus, qui peuvent être stockés (7,5h de stockage). La turbine SST-700 de 50 MW_e a un rendement de conversion de 38,1%.

Les spécificités techniques des collecteurs solaires, synthétisés dans les Tables 2 et 3 (pp.47-48) du chapitre I nous informent que la réflectance solaire des miroirs est de 93,5%, la transmittance solaire du tube en verre est de 96,3% (pour 2,5 mm d'épaisseur) et l'absorptance solaire du revêtement sélectif est 96% pour une émittance corps noir de 9,4% à 400°C (pour le PTR-70) soit un rendement héliothermique de 90,6% en tenant compte de la forme cylindrique de l'absorbeur. Face à cela nous proposons, à titre d'exemple :

- Un miroir d'une réflectance solaire de 97,6% (soit +4,1%), constitué d'une base d'argent (qui peut être un support verre avec une couche mince d'argent), de quatre périodes MgF₂/TiO₂ et d'une couche protectrice de 10 µm de SiO₂, tel que décrit dans le chapitre IV.
- Un tube en verre BK7[®] de 2,5 mm d'épaisseur, recouvert du côté extérieur d'un antireflet solaire SiO₂ poreux avec une couche de protection de 15 nm de SiO₂ dense, et du côté intérieur d'un antireflet SiO₂ poreux bicouche (chapitre V), d'une transmittance solaire globale de 98,1% (soit +1,8%). Nous avons tenu compte de la modification du spectre solaire incident par le miroir argent utilisé en amont pour le calcul de la transmittance solaire et l'optimisation des couches antireflet.
- Un absorbeur sélectif obtenu par l'empilement de deux bicouches W/W-Al₂O₃ et d'une couche antireflet SiO₂ dense. L'empilement est spécifiquement optimisé pour le taux de concentration de la centrale ($C = 82$) et sa température de fonctionnement (400°C). L'optimisation tient compte du spectre solaire local et de sa modification par les surfaces précédentes. Dans ces conditions, le rendement héliothermique de l'absorbeur sélectif est de 91,5% (soit +0,9%).

Au total, le gain de performance sur l'optique et les pertes thermiques radiatives des collecteurs est de 6,8%. Cela représente 74 GWh_{th} (GWh thermiques) supplémentaires produits annuellement par la centrale. En posant l'hypothèse que les autres pertes de la centrale sont de l'ordre de 15% (ordre de grandeur des autres pertes thermiques, parasites, stockage, voir chapitre I, Figure 18 p.45), cette puissance correspond à 63 GWh_{th} supplémentaires envoyés à la turbine annuellement, soit 24 GWh_e de production électrique annuelle supplémentaire. Cette énergie additionnellement produite représente annuellement pour les exploitants d'une telle centrale 6,5 millions d'euro de revenus supplémentaires, et de l'électricité fournie à environ 5000 foyers supplémentaires.

De nombreuses autres pistes issues de nos travaux sont également possibles. Par exemple, remplacer les miroirs actuels à base argent par des miroirs du même type à base d'aluminium permettrait une économie de matière de 1,5 g d'argent par m² de miroir (épaisseur de 150 nm), soit presque 800 kg pour la centrale de type Andasol, ce qui représente une économie potentielle de 840 k€⁴. Mais une telle économie pourrait ne pas compenser la perte de 1,5% sur la réflectance solaire. Remplacer le tube en verre BK7[®] par du BK10[®] augmenterait la

⁴ Pour ce calcul, nous avons utilisé le prix de cibles de pulvérisation PVD « Kurt J. Lesker » d'argent et d'aluminium.

transmittance solaire de 0,35% (chapitre V). Idéalement, il faudrait également remplacer le matériau du traitement sélectif W/W-Al₂O₃ par un empilement de bicouches Ta/Zr-SiO₂ (matériau idéal pour ce niveau de température/concentration, chapitre VI) ce qui permettrait d'augmenter le rendement héliothermique à 93,1% soit un gain de 1,6%.

Autres perspectives

A l'issue de nos travaux nous présentons plusieurs perspectives :

En parallèle de l'étude théorique, les empilements identifiés ici comme les plus performants pourraient être fabriqués et caractérisés au laboratoire PROMES et/ou chez des collaborateurs, afin de valider les concepts développés dans cette thèse, et de fournir in fine des solutions couches minces originales et très performantes pour les composants des collecteurs solaires. Nous pensons particulièrement à ceux présentés dans le paragraphe précédent : des dépôts diélectriques MgF₂/TiO₂ sur des miroirs métalliques, des antireflets poreux multicouches (avec ou sans couche de protection dense) et des traitements sélectifs métal/cermet/antireflet. Certaines de ces solutions pourront d'ailleurs faire l'objet de dépôts de brevets dans un futur proche.

Il serait également intéressant de réaliser une étude technico-économique sur la fabrication des revêtements identifiés comme les plus avantageux, ainsi que sur leur apport en termes d'abaissement des coûts d'investissement et/ou d'augmentation de production électrique des centrales solaires qui les utilisent. En effet tous les revêtements proposés sont plus complexes que les solutions existantes : on passerait d'antireflets denses vers des antireflets poreux, de miroirs métalliques simples vers des miroirs métalliques avec diélectrique, de traitements sélectifs avec cermets à gradient de composition vers des empilements métal/cermet, etc. Le gain de performance amené par ces solutions doit être rapporté à l'augmentation potentielle du coût de fabrication de chaque surface. A partir du gain de production annuel calculé dans le cas d'Andasol, nous pouvons établir un premier ordre de grandeur. 6,5 millions d'euro annuels supplémentaires gagnés pendant 10 ans représentent, rapportés à la surface du champ solaire (510 000 m²), 127 €/m² supplémentaires gagnés en dix ans. Les miroirs et absorbeurs représentant environ 40% du coût d'investissement du champ, le surcoût maximum admissible en utilisant des surfaces plus performantes serait de l'ordre de 55€/m². Cette première évaluation devra être affinée par une étude plus approfondie.

Enfin, l'ensemble des performances solaires présentées dans cette thèse sont calculées grâce un code de simulation et d'optimisation fonctionnant sous Scilab, logiciel de calcul matriciel libre et gratuit. Le code intègre aujourd'hui une large base de données de matériaux correspondant aux nombreux empilements étudiés ici. Cette base de données est évolutive car facilement alimentable par l'utilisateur. Le code comprend également une base de données de nos spectres solaires locaux. Il fonctionne actuellement grâce à une interface simplifiée condensant l'intégralité des paramètres de commandes accessibles à l'utilisateur sur environ 30 lignes de code. Il est actuellement utilisé en interne dans l'équipe PPCM du laboratoire PROMES (thèse de Laurie Di Giacomo sur les revêtements sélectifs) et a servi dans le cadre d'une collaboration extérieure avec l'université d'Arizona sur les miroirs PV/CPV. Ce code pourrait à l'avenir être commercialisé sous une nouvelle interface graphique, ou intégré comme

un module dans des outils plus complets de conception, d'étude et de diagnostic des centrales solaires.

Bibliographie

- [1] J. Cahill, "The Olympic Flame and Torch : Running Towards Sydney 2000," *Fourth Int. Symp. Olympic Res.*, pp. 181–190, 2000.
- [2] A. D. L. Simms, "Archimedes and the Burning Mirrors of Syracuse Technology Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/3103202> Linked references are available on JSTOR for this article : Archimedes and the Burning Mirrors of Syracuse," vol. 18, no. 1, pp. 1–24, 2017.
- [3] F. Hénault, *Optique et concentration de l'énergie solaire, cours "Optique non imageante,"* Université Grenoble-Alpes, 2017.
- [4] H. Gernsback and H. W. Secor, "The utilization of the Sun's Energy," *Electr. Exp.*, vol. 3, no. 11, 1916.
- [5] F. Shuvan and C. V. Boys, "Sun Boiler application field," US 1240890 A, 1912.
- [6] D. Guthleben, "Coup de soleil au CNRS," pp. 5–10, 2007.
- [7] International Energy Agency IEA, *Solar Energy Perspectives*. 2011.
- [8] S. Thomas F, *Changements climatiques 2013, Les éléments scientifiques, Résumé à l'intention des décideurs, résumé technique et foire aux questions*. 2013.
- [9] "Organisation des Nations Unies." [Online]. Available: <http://www.un.org/fr/index.html>. [Accessed: 05-Apr-2017].
- [10] "Conférences des Parties n°21." [Online]. Available: <http://www.cop21paris.org/>. [Accessed: 21-Aug-2015].
- [11] J. Percebois et al., *Rapport énergies 2050*, Rapport du. 2012.
- [12] R. Perez and M. Perez, "A Fundamental Look At Supply Side Energy Reserves For The Planet," *Int. Energy Agency SHC Program. Sol. Updat.*, no. April 2009, pp. 4–6, 2015.
- [13] "Solar Gis." [Online]. Available: <https://solargis.info/>. [Accessed: 07-Apr-2017].
- [14] B. Vest, "Levelized Cost and Levelized Avoided Cost of New Generation Resources in the Annual Energy Outlook 2016," *Us Eia Lcoe*, no. August, pp. 1–20, 2016.
- [15] J. Hernandez-Moro and J. M. Martinez-Duart, "Analytical model for solar PV and CSP electricity costs: Present LCOE values and their future evolution," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 20, pp. 119–132, 2013.
- [16] V. Jullch, "Comparison of electricity storage options using levelized cost of storage (LCOS) method," *Appl. Energy*, vol. 183, pp. 1594–1606, 2016.
- [17] International Energy Agency IEA and National Energy Agency NEA, *Projected costs of generating electricity*. 2015.
- [18] A. Gil et al., "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1-Concepts, materials and modellization," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 31–55, 2010.

- [19] M. Medrano, A. Gil, I. Martorell, X. Potau, and L. F. Cabeza, "State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2-Case studies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 56–72, 2010.
- [20] P. Denholm, Y. H. Wan, M. Hummon, and M. Mehos, "The value of CSP with thermal energy storage in the western United States," *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1622–1631, 2013.
- [21] ADEME, Artelys, Armines, and Energies Demain, "A 100 % renewable electricity mix ? Analysis and optimisation," January 2016.
- [22] Estela, Greenpeace, and SolarPACES, "Solar Thermal Electricity - Global Outlook 2016," p. 114, 2016.
- [23] "Web site of NREL." *Natl. Renew. Energy Lab*, [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/>. [Accessed: 03-Jan-2017].
- [24] K. Fisher, Z. Yu, R. Striling, and Z. Holman, "PVMirrors: Hybrid PV/CSP Collectors That Enable Lower LCOEs," pp. 1–6.
- [25] "Web site of Areva Solar," *Areva Solar*, 2017. [Online]. Available: <http://www.areva.com/EN/solar-220/areva-solar.html>. [Accessed: 20-Aug-2015].
- [26] Minamo J.C, Gonzales J.C, and Benitez. P, "New nonimaging designs: the RX and RXI concentrators," *Proc. SPIE*, vol. vol 2016, pp. 120–127, 2016.
- [27] N. El Gharbi, H. Derbal, S. Bouaichaoui, and N. Said, "A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies," *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 565–572, 2011.
- [28] Ph. Mulcey, "Panneau solaire thermique à rendement eleve," 2 956 727, 2012.
- [29] *Documents internet de Helioprocess, disponible sur demande auprès de l'auteur*. 2017, Perpignan.
- [30] "GlassPoint Solar." [Online]. Available: <https://www.glasspoint.com/>. [Accessed: 14-Dec-2016].
- [31] "HelioVis." [Online]. Available: <https://heliovis.com/>. [Accessed: 14-Dec-2015].
- [32] B. Bierman, J. O'Donnell, R. Burke, M. McCormick, and W. Lindsay, "Construction of an Enclosed Trough EOR system in South Oman," *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1756–1765, 2013.
- [33] B. Bierman, J. O'Donnell, R. Burke, and M. McCormick, "Performance of an Enclosed Trough EOR system in South Oman," *Energy Procedia*, vol. 49, 2013.
- [34] B. Hirschmann, G. Oreski, and G. Pinter, "Thermo-mechanical characterisation of fluoropolymer films for concentrated solar thermal applications," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 130, pp. 615–622, 2014.
- [35] S. Benyakhlef *et al.*, "Development of Ray Tracing Code for Modeling Linear Fresnel Collector Systems," *Int. Conf. Mech. Energy*, 2014.
- [36] W. T. Xie, Y. J. Dai, R. Z. Wang, and K. Sumathy, "Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 6, pp. 2588–2606, 2011.
- [37] K. K. Chong, S. L. Lau, T. K. Yew, and P. C. L. Tan, "Design and development in optics of concentrator photovoltaic system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 598–612, 2013.
- [38] D. Chemisana, "Building integrated concentrating photovoltaics: A review," *Renew. Sustain.*

Energy Rev., vol. 15, no. 1, pp. 603–611, 2011.

- [39] T. M. Pavlović, I. S. Radonjić, D. D. Milosavljević, and L. S. Pantić, “A review of concentrating solar power plants in the world and their potential use in Serbia,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 3891–3902, 2012.
- [40] V. Siva Reddy, S. C. Kaushik, K. R. Ranjan, and S. K. Tyagi, “State-of-the-art of solar thermal power plants - A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 258–273, 2013.
- [41] M. H. Ahmadi, H. Sayyaadi, A. H. Mohammadi, and M. A. Barranco-Jimenez, “Thermo-economic multi-objective optimization of solar dish-Stirling engine by implementing evolutionary algorithm,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 73, pp. 370–380, 2013.
- [42] Y. Bravo *et al.*, “Environmental evaluation of dish-Stirling technology for power generation,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2811–2825, 2012.
- [43] “Zed Solar.” [Online]. Available: <http://zedsolar.com/>. [Accessed: 05-Jan-2016].
- [44] O. Behar, A. Khellaf, and K. Mohammedi, “A review of studies on central receiver solar thermal power plants,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 12–39, 2013.
- [45] B. Mills, C. K. Ho, J. M. Christian, and G. Peacock, “Novel Particle Release Patterns for Increased Receiver Thermal Efficiency,” no. 505.
- [46] P. Fernández and F. J. Miller, “Performance analysis and preliminary design optimization of a Small Particle Heat Exchange Receiver for solar tower power plants,” *Sol. Energy*, vol. 112, pp. 458–468, 2015.
- [47] Sargent & Lundy LLC Consulting Group, “Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts Assessment of Parabolic Trough and Power Tower Solar Technology Cost and Performance Forecasts,” October, p. 344, 2003.
- [48] B. Grange *et al.*, “Preliminary Optical, Thermal and Structural Design of a 100 kWth CSPonD Beam-down On-sun Demonstration Plant,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 2163–2168, 2015.
- [49] C. F. Chen, C. H. Lin, and H. T. Jan, “A solar concentrator with two reflection mirrors designed by using a ray tracing method,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 121, no. 11, pp. 1042–1051, 2010.
- [50] Y. Zhang, G. Xiao, Z. Luo, M. Ni, T. Yang, and W. Xu, “Comparison of different types of secondary mirrors for solar application,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 125, no. 3, pp. 1106–1112, 2014.
- [51] Lisa Edelmann; Robert J. Desnick, “Solar-energy collector/concentrator with cassegrain-type optics,” *US Pat. Appl. Publ.*, vol. 1, no. 12, pp. 1–38, 2014.
- [52] C. Atkinson, C. L. Sansom, H. J. Almond, and C. P. Shaw, “Coatings for concentrating solar systems - A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 113–122, 2015.
- [53] R. Tidball, J. Bluestein, N. Rodriguez, and S. Knoke, “Cost and performance assumptions for modeling electricity generation technologies,” *Natl. Renew. Energy Lab, NREL, Subcontract Rep.*, no. November, pp. 37–41, 2010.
- [54] J. T. Hinkley *et al.*, “An analysis of the costs and opportunities for concentrating solar power in Australia,” *Renew. Energy*, vol. 57, pp. 653–661, 2013.
- [55] IRENA, “Renewable Energy Technologies Cost Analysis Series: Concentrating Solar Power,” *Compr. Renew. Energy*, vol. 3, no. 2, pp. 595–636, 2012.
- [56] R. Pitz-Pall, J. Dersch, and B. Milow, “European Concentrated Solar Thermal Road-Mapping,” *Concrete*, 2003.

- [57] “SAM, System Advisor Model.” [Online]. Available: <https://sam.nrel.gov/>. [Accessed: 04-Sep-2015]. *Natl. Renew. Energy Lab, NREL*
- [58] François Hénault, *Optique et concentration de l'énergie solaire, cours “Optique non imageante.”* Université Grenoble-Alpes, 2013.
- [59] “Web site of Alanod Solar.”, *Alanod Solar*, [Online]. Available: <http://www.alanod-solar.com/de>. [Accessed: 20-Aug-2015].
- [60] “Web site Beaconergy.”, *Beaconergy*, [Online]. Available: <http://beaconergy.com/en/>. [Accessed: 20-Aug-2015].
- [61] A. Mani, O. Chacko, and S. Heriharan, “A Study of Ångström’s turbidity parameters from solar radiation measurements in India,” *Tellus*, vol. 21, no. 6, pp. 829–843, 1969.
- [62] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, and L. L. Kazmerski, “A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 698–733, 2013.
- [63] “Web site of Archimede Solar Energy.”, *Archimede Solar Energy*, [Online]. Available: <http://www.archimedesolarenergy.it/>. [Accessed: 20-Aug-2015].
- [64] C. A. Gueymard, G. López, I. Rapp-arrarás, G. López, and I. Rapp-arrarás, “Atmospheric Transmission Loss in Mirror-To-Tower Slant Ranges Due to Water Vapor,” vol. 140010, 2017.
- [65] C. E. Kennedy and K. Terwilliger, “Optical Durability of Candidate Solar Reflectors,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 127, no. 2, p. 262, 2005.
- [66] “ISO 9050 : Glass in building - Determination of lighth transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors,” 2003.
- [67] “ISO 9845-1:1922 Solar energy - Reference solar spectral irradiance at the ground at different receiving conditions.”
- [68] S. Meyen, M. Montecchi, C. Kennedy, and G. Zhu, “Parameters and method to evaluate the solar reflectance properties of reflector materials for concentrating solar power technology,” *SolarPACES*, no. June, 2013.
- [69] C. K. Ho and B. D. Iverson, “Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 835–846, 2014.
- [70] W. T. Welford and R. Winston, *The Optics of Nonimaging Concentrators Light and Solar Energy*, vol. 33. 1978.
- [71] C. C. Katsidis and D. I. Siapkas, “General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference,” *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 19, pp. 3978–3987, 2002.
- [72] B. A. Moys, T. General, and E. Company, “The theory of double-layer antireflection coatings,” vol. 21, pp. 145–157, 1974.
- [73] P. A. Ledin, J. Kerszulis, M. A. Mahmoud, M. A. El-sayed, J. R. Reynolds, and V. V. Tsukruk, “Electrically Tunable Plasmonic Behavior of Nanocube - Polymer Nanomaterials Induced by a Redox- Active Electrochromic Polymer,” *acs nano*, 2014.
- [74] D. Stroud, “The effective medium approximations: Some recent developments,” *Superlattices Microstruct.*, vol. 23, no. 3, pp. 567–573, 1998.
- [75] D. E. Aspnes, J. B. Theeten, and F. Hottier, “Investigation of effective-medium models of

- microscopic surface roughness by spectroscopic ellipsometry,” *Phys. Rev. B*, vol. 20, no. 8, pp. 3292–3302, 1979.
- [76] F. Thiel and I. M. Sokolov, “Effective-medium approximation for lattice random walks with long-range jumps,” *Phys. Rev. E - Stat. Nonlinear, Soft Matter Phys.*, vol. 94, no. 1, pp. 1–11, 2016.
 - [77] T. Stoffel, D. Renné, D. Myers, and S. Wilcox, “Concentrating Solar Power: Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data,” *Nrel/Tp-550-47465*, no. September, p. 146, 2010.
 - [78] “Web site of Nasa Earth Observatory,” 2017. [Online]. Available: <http://earthobservatory.nasa.gov/>.
 - [79] D. R. Myers, K. Emery, and C. Gueymard, “Revising and Validating Spectral Irradiance Reference Standards for Photovoltaic Performance Evaluation,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 126, no. 1, p. 567, 2004.
 - [80] C. A. Gueymard, “The sun’s total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models,” *Sol. Energy*, vol. 76, no. 4, pp. 423–453, 2004.
 - [81] C. A. Gueymard, D. Myers, and K. Emery, “Proposed reference irradiance spectra for solar energy systems testing,” *Sol. Energy*, vol. 73, no. 6, pp. 443–467, 2002.
 - [82] C. A. Gueymard, “Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and performance assessment,” *Florida Sol. Energy Cent.*, 1995.
 - [83] B. Anselme and S. Gadai, *Elements de physique du rayonnement*, Université. Paris, 2008.
 - [84] J. Bilbao, R. Román, C. Yousif, A. Pérez-Burgos, and M. A. De, “Global, diffuse, direct, and ultraviolet solar irradiance recorded in Malta and atmospheric component influences,” *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 1206–1210, 2014.
 - [85] C. A. Gueymard, “Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data,” *Sol. Energy*, vol. 51, no. 2, pp. 121–138, 1993.
 - [86] C. A. Gueymard, “SMARTS-2.9.5. For Windows USER ’ S MANUAL,” *Read*, 2005.
 - [87] D. R. Myers and C. a Gueymard, “Description and Availability of the SMARTS Spectral Model for Photovoltaic Applications,” *Nrel*, no. August, pp. 1–12, 2004.
 - [88] Y. Tamar, M. Tzabari, C. Haspel, and Y. Sasson, “Estimation of the porosity and refractive index of sol-gel silica films using high resolution electron microscopy,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 130, pp. 246–256, 2014.
 - [89] A. Soum-Glaude, I. Bousquet, L. Thomas, and G. Flamant, “Optical modeling of multilayered coatings based on SiC(N)H materials for their potential use as high-temperature solar selective absorbers,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 117, pp. 315–323, 2013.
 - [90] D. Karthik, S. Pendse, S. Sakthivel, E. Ramasamy, and S. V. Joshi, “High performance broad band antireflective coatings using a facile synthesis of ink-bottle mesoporous MgF2 nanoparticles for solar applications,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 159, pp. 204–211, 2017.
 - [91] L. Guillopé, *Optimisation sous contrainte*, Laboratoire. 2012.
 - [92] D. Henrion, J. B. Lasserre, and J. Löfberg, “GloptiPoly 3: moments, optimization and semidefinite programming,” *Optim. Methods Softw.*, vol. 24, no. 4–5, pp. 761–779, 2009.
 - [93] V. Gardeux, “Conception d’heuristique d’optimisation pour les problèmes de grande dimension :

application à l'analyse de données de puces à ADN,” 2011.

- [94] A. Vossier, A. Riverola, D. Chemisana, A. Dollet, and C. A. Gueymard, “Is conversion efficiency still relevant to quality advanced multi-junction solar cells?,” *Prog. Photovolt Res. Appl.*, pp. 659–676, 2016.
- [95] J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems : An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence*. Bradford Book, 1975.
- [96] R. Hassan and B. Cohanin, “A comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm,” *1st AIAA Multidiscip. Des. Optim. Spec. Conf.*, pp. 1–13, 2005.
- [97] S. Enterprises, “Scilab v5.5.0.” [Online]. Available: Available online (<https://www.scilab.org/fr>) [Accessed: 20-Aug-2015].
- [98] M. Matsumoto and T. Nishimura, “Mersenne Twister : A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator,” *Discrete Math.*, 1998.
- [99] J. Mouret, “Evolutionary Adaptation in Natural and Artificial Systems,” 2016.
- [100] R. Akbari and K. Ziarati, “A multilevel evolutionary algorithm for optimizing numerical functions,” *Int. J. Ind. Eng. Comput.*, vol. 2, no. 2, pp. 419–430, 2011.
- [101] K. M. McPeak *et al.*, “Plasmonic films can easily be better: Rules and recipes,” *ACS Photonics*, vol. 2, no. 3, pp. 326–333, 2015.
- [102] P. E. Ciddor, “Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared,” *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 9, pp. 1566–1573, 1996.
- [103] L. Di Giacomo, “PACVD/PVD de multicouches sélectives pour la conversion thermique de l'énergie solaire,” Université de Perpignan Via Domitia, 2017.
- [104] D. Franta and I. Ohlidal, “Comparison of effective medium approximation and Rayleigh-Rice theory concerning ellipsometric characterization of rough surfaces,” *Opt. Commun.*, vol. 248, no. 4–6, pp. 459–467, 2005.
- [105] B. N. Holben *et al.*, “AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 66, no. 1, pp. 1–16, 1998.
- [106] A. Ångström, “The parameters of atmospheric turbidity,” *Tellus*, vol. 16, no. 1, pp. 64–75, 1964.
- [107] A. Guechi, M. Chegaar, and M. Aillerie, “Air mass effect on the performance of organic solar cells,” *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 714–721, 2013.
- [108] W.F. J. Evans, North West Research Associates, Bellevue, WA; and E. Puckrin “Measurements of the radiative surface forcing of climate,” *18th Conf. Clim. Var. Chang.*, pp. 1–8, 2006.
- [109] W. Version, “User Interface : Simple Model of Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine,” no. April, 2003.
- [110] A. Fallis, “U.S. Standard Atmosphere,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [111] D. R. Myers, S. R. Kurtz, and N. Renewable, “Preliminary Investigations of Outdoor Meteorological Broadband and Spectral Conditions for Evaluating Photovoltaic Modules and Systems,” 2000.
- [112] J. Polo, L. F. Zarzalejo, P. Salvador, and L. Ramírez, “Angstrom turbidity and ozone column

- estimations from spectral solar irradiance in a semi-desertic environment in Spain,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 2, pp. 257–263, 2009.
- [113] R. R. Cordero *et al.*, “The Solar Spectrum in the Atacama Desert,” *Sci. Rep.*, vol. 6, p. 22457, 2016.
 - [114] A. Marzo, P. Feerada, F. Beiza, and R. Roman, “Comparison of Atacam Desert Solar Spectrum,” EuroSun 2016, *Conférence Paper*, Oct 2016, pp. 1–2.
 - [115] N. Science and M. Chiesa, “Solar Energy Deployment in the UAE : The role of the Masdar Institute Solar Energy Deployment in the UAE : The role of the Masdar Institute.”
 - [116] X. D. He, K. E. Torrance, F. X. Sillion, and D. P. Greenberg, “A comprehensive physical model for light reflection,” *ACM SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 25, no. 4, pp. 175–186, 1991.
 - [117] K. E. Torrance and E. M. Sparrow, “Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 57, no. 9, pp. 1105–1114, 1967.
 - [118] H. Bennett and J. O. Porteus, “Relation Between Roughness and Specular Reflectance,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 51, no. 4, pp. 2283–2285, 1961.
 - [119] “RioGlass.” [Online]. Available: <http://www.rioglass.com/>. [Accessed: 20-Aug-2015].
 - [120] “Guardian Glass,” 2017. [Online]. Available: <https://www.guardianglass.com>. [Accessed: 07-Feb-2015].
 - [121] A. Fernández-García, M. E. Cantos-Soto, M. Röger, C. Wieckert, C. Hutter, and L. Martínez-Arcos, “Durability of solar reflector materials for secondary concentrators used in CSP systems,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 130, pp. 51–63, 2014.
 - [122] F. Sutter *et al.*, “Durability Testing of Silvered-Glass Mirrors,” *Energy Procedia*, vol. 69, pp. 1568–1577, 2015.
 - [123] A. D. Rakic, A. B. Djuricic, J. M. Elazar, and M. L. Majewski, “Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices,” *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 22, pp. 5271–5283, 1998.
 - [124] M. A. Ordal, R. J. Bell, R. W. Alexander, L. L. Long, and M. R. Querry, “Optical properties of Au, Ni, and Pb at submillimeter wavelengths,” *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 4, pp. 744–752, 1987.
 - [125] V. K. Jebsingh and G. M. J. Herbert, “A review of solar parabolic trough collector,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 1085–1091, 2016.
 - [126] P. B. Johnson and R. W. Christy, “Optical constants of the noble metals,” *Physical Review B*, vol. 6, no. 12, pp. 4370–4379, 1972.
 - [127] S. Babar and J. H. Weaver, “Optical constants of Cu, Ag, and Au revisited,” *Appl. Opt.*, vol. 54, no. 3, p. 477, 2015.
 - [128] H. J. Hagemann, W. Gudat, and C. Kunz, “Optical-constants From Far Infrared To X-ray Region - Mg, Al, Cu, Ag, Au, Bi, C, and Al₂O₃,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 65, no. 6, pp. 742–744, 1975.
 - [129] H. Sverdrup, D. Koca, and K. V. Ragnarsdottir, “Investigating the sustainability of the global silver supply, reserves, stocks in society and market price using different approaches,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 83, pp. 121–140, 2014.
 - [130] D. H. Meadows, *The Limits to Growth*, 2004th ed. New York, 1972.
 - [131] A. Mazuelas, R. Hey, M. Wassermeier, and H. T. Grahn, “Strain compensation in highly carbon

- doped GaAs/AlAs distributed Bragg reflectors,” *J. Cryst. Growth*, vol. 175, no. 176, pp. 383–386, 1997.
- [132] T. Skauli *et al.*, “Improved dispersion relations for GaAs and applications to nonlinear optics,” *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 10, pp. 6447–6455, 2003.
 - [133] M. J. Dodge, “Refractive properties of magnesium fluoride,” *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 12, p. 1980, 1984.
 - [134] 3M, “3M Cool Mirror Film 330,” vol. 330, no. May, pp. 8–9, 2013.
 - [135] 3M, “Vikuiti Enhanced Specular Reflector (ESR) A reflector for a brighter , more efficient display Features : How it works.”
 - [136] C. K. Ho, J. Sment, J. Yuan, and C. A. Sims, “Evaluation of a reflective polymer film for heliostats,” *Sol. Energy*, vol. 95, pp. 229–236, 2013.
 - [137] A. García-segura, A. Fernández-garcía, M. J. Ariza, F. Sutter, and L. Valenzuela, “Durability studies of solar reflectors : A review,” vol. 62, pp. 453–467, 2016.
 - [138] SCHOTT North America Inc, “Optical Glass - Data Sheets,” 2015.
 - [139] NREL, *Natl. Renew. Energy Lab*, “Advanced Reflectors,” *Natl. Renew. Energy Lab.*, pp. 1–60, 2010.
 - [140] M. Fedel, C. Zanella, S. Rossi, and F. Deflorian, “Corrosion protection of silver coated reflectors by atomic layer deposited Al₂O₃,” *Sol. Energy*, vol. 101, pp. 167–175, 2014.
 - [141] C. E. Kenndy, V. Smilgys, D. A. Kirkpatrick, and J. S. Ross, “Optical performance and durability of solar reflectors protected by an alumina coating,” vol. 304, pp. 303–309, 1997.
 - [142] Y. J. Xu, J. X. Liao, Q. W. Cai, and X. X. Yang, “Preparation of a highly-reflective TiO₂/SiO₂/Ag thin film with self-cleaning properties by magnetron sputtering for solar front reflectors,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 113, pp. 7–12, 2013.
 - [143] C. M. Maghanga, J. Jensen, G. A. Niklasson, C. G. Granqvist, and M. Mwamburi, “Transparent and conducting TiO₂:Nb films made by sputter deposition: Application to spectrally selective solar reflectors,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 1, pp. 75–79, 2010.
 - [144] L. Gao, F. Lemarchand, and M. Lequime, “Exploitation of multiple incidences spectrometric measurements for thin film reverse engineering,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 14, pp. 15734–51, 2012.
 - [145] J. Kischkat *et al.*, “Mid-infrared optical properties of thin films of aluminum oxide, titanium dioxide, silicon dioxide, aluminum nitride, and silicon nitride,” *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 28, pp. 6789–6798, 2012.
 - [146] R. Gee and G. Jorgensen, “Reflectech mirror film attributes and durability for CSP applications,” no. May, pp. 1–6, 2009.
 - [147] R. Gee and G. Jorgensen, “ES2009-90336,” no. May 2009, pp. 1–6, 2016.
 - [148] G. J. Jorgensen and R. Gee, “Advanced ultraviolet-resistane silver mirrors for use in solar reflectors,” US 7,616,937 B2, 2009.
 - [149] H. K. Raut, V. A. Ganesh, A. S. Nair, and S. Ramakrishna, “Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 4, no. 10, p. 3779, 2011.
 - [150] C. Granqvist, “Materials for solar energy conversion: An overview,” *Sol. Energy Mater. Sol.*

- Cells*, vol. 54, no. 1–4, pp. 39–48, 1998.
- [151] J. Deubener, G. Hellsch, A. Moiseev, and H. Bornhöft, “Glasses for solar energy conversion systems,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 29, no. 7, pp. 1203–1210, 2009.
 - [152] T. Okuno, “Development of Subwavelength Structure Coating (SWC) and its Application to Imaging Lenses,” *Int. Opt. Des. Conf. Opt. Fabr. Test.*, vol. 7652, no. 1, p. IMA2, 2010.
 - [153] A. Jonsson, A. Roos, and E. K. Jonson, “The effect on transparency and light scattering of dip coated antireflection coatings on window glass and electrochromic foil,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 94, no. 6, pp. 992–997, 2010.
 - [154] T. Morimoto, Y. Sanada, and H. Tomonaga, “Wet chemical functional coatings for automotive glasses and cathode ray tubes,” *Thin Solid Films*, vol. 392, no. 2, pp. 214–222, 2001.
 - [155] L. Vaissie, Johnson, O. V. Smolski, and A. M. ; E.G., “High efficiency surface-emitting laser with subwavelength antireflection structure,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 17, no. 4, pp. 732–734, 2005.
 - [156] H. Weiss, “Physics and technology of data storage,” *Solid. State. Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 347–356, 1976.
 - [157] RefractiveIndex.INFO, Refractive Index Database, [Online]. Available: <http://refractiveindex.info>, [Accessed: 20-Aug-2015].
 - [158] H. K. Raut, A. S. Nair, S. S. Dinachali, V. A. Ganesh, T. M. Walsh, and S. Ramakrishna, “Porous SiO₂ anti-reflective coatings on large-area substrates by electrospinning and their application to solar modules,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 111, pp. 9–15, 2013.
 - [159] S. Chattopadhyay, Y. F. Huang, Y. J. Jen, A. Ganguly, K. H. Chen, and L. C. Chen, “Anti-reflecting and photonic nanostructures,” *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 69, no. 1–3, pp. 1–35, 2010.
 - [160] H. Groh and A. Zimmermann, “What Is the Lowest Refractive Index of an Organic Polymer ?,” *Journal of Macromolecules*, vol. 24, pp. 6660–6663, Dec. 1991.
 - [161] G. San Vicente, R. Bayón, N. Germán, and A. Morales, “Surface modification of porous antireflective coatings for solar glass covers,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 4, pp. 676–680, 2011.
 - [162] C. Xin, C. Peng, Y. Xu, and J. Wu, “A novel route to prepare weather resistant, durable antireflective films for solar glass,” *Sol. Energy*, vol. 93, pp. 121–126, 2013.
 - [163] C. S. Thompson, R. A. Fleming, and M. Zou, “Transparent self-cleaning and antifogging silica nanoparticle films,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 115, pp. 108–113, 2013.
 - [164] W. Glaubitt and P. Löbmann, “Antireflective coatings prepared by sol-gel processing: Principles and applications,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 32, no. 11, pp. 2995–2999, 2012.
 - [165] P. Karasiński, J. Jaglarz, M. Reben, E. Skoczek, and J. Mazur, “Porous silica xerogel films as antireflective coatings - Fabrication and characterization,” *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 33, no. 12, pp. 1989–1994, 2011.
 - [166] D. B. Mahadik, R. V. Lakshmi, and H. C. Barshilia, “High performance single layer nano-porous antireflection coatings on glass by sol-gel process for solar energy applications,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 140, pp. 61–68, 2015.
 - [167] A. Soleimani Dorcheh and M. H. Abbasi, “Silica aerogel; synthesis, properties and characterization,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 199, no. 1, pp. 10–26, 2008.

- [168] H. K. Raut, S. S. Dinachali, K. K. Ansah-Antwi, V. Anand Ganesh, and S. Ramakrishna, "Fabrication of highly uniform and porous MgF_2 anti-reflective coatings by polymer-based sol-gel processing on large-area glass substrates," *Nanotechnology*, vol. 24, no. 50, p. 505201, 2013.
- [169] X. Gao *et al.*, "The dry-style antifogging properties of mosquito compound eyes and artificial analogues prepared by soft lithography," *Adv. Mater.*, vol. 19, no. 17, pp. 2213–2217, 2007.
- [170] L. Yao and J. He, "Recent progress in antireflection and self-cleaning technology - From surface engineering to functional surfaces," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 61, pp. 94–143, 2014.
- [171] W. L. Min, B. Jiang, and P. Jiang, "Bioinspired self-cleaning antireflection coatings," *Adv. Mater.*, vol. 20, no. 20, pp. 3914–3918, 2008.
- [172] C. S. Thompson and M. Zou, "Investigation of Moth-Eye Antireflection Coatings for Photovoltaic Cover Glass Using FDTD Modeling Method," pp. 2273–2275, 2014.
- [173] M. Daimon and A. Masumura, "High-accuracy measurements of the refractive index and its temperature coefficient of calcium fluoride in a wide wavelength range from 138 to 2326 nm," *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 25, pp. 5275–81, 2002.
- [174] D. Franta, I. Ohlídal, and D. Petrádes, "Optical characterization of TiO_2 thin films by the combined method of spectroscopic ellipsometry and spectroscopic photometry," *Vacuum*, vol. 80, no. 1–3, pp. 159–162, 2005.
- [175] W. L. Bond, "Measurement of the refractive indices of several crystals," *J. Appl. Phys.*, vol. 36, no. 5, pp. 1674–1677, 1965.
- [176] "Sigma Aldrich," 2017. [Online]. Available: <http://www.sigmaaldrich.com/france.html>. [Accessed: 30-Oct-2017].
- [177] C. Yang, S. Lien, C. Chu, C. Kung, T. Cheng, and P. Chen, "Effectively Improved SiO_2 – TiO_2 Composite Films Applied in Commercial Multicrystalline Silicon Solar Cells," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2013, 2013.
- [178] N. K. Sahoo, S. Thakur, R. B. Tokas, and N. M. Kamble, "Relative performances of effective medium formulations in interpreting specific composite thin films optical properties," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 253, no. 16, pp. 6787–6799, 2007.
- [179] J.F. Lelievre, "Elaboration de $\text{SiN}_x\text{:H}$ par PECVD : optimisation des propriétés optiques , passivantes et structurales pour applications photovoltaïques," *Thèse de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*, soutenue le 24 avril 2007.
- [180] P. Béatrice, "Étude des interactions plasma/surface pour la compréhension de la croissance de couches minces SiCN:H et de leur interface film/substrat : répercussions sur leurs propriétés," 2017.
- [181] H. L. Yang, L. Hao, J. N. Wang, Z. N. Zhang, X. P. Liu, and L. J. Jiang, "Self-Cleaning and Antireflective Films for All-Glass Evacuated Tube Solar Collectors," *Energy Procedia*, vol. 69, pp. 226–232, 2015.
- [182] Liu, S. and Han, M. (2010), Silica-Coated Metal Nanoparticles. *Chem. Asian J.*, 5: 36–45. doi:10.1002/asia.200900228
- [183] Y. Kobayashi, M. Horie, M. Konno, B. Rodri, and L. M. Liz-marza, "Preparation and Properties of Silica-Coated Cobalt Nanoparticles †," pp. 7420–7425, 2003.
- [184] "Schott." [Online]. Available: <http://www.schott.com/english/index.html>. [Accessed: 01-Jan-2015].

- [185] A. Grosjean, A. Soum-glaude, L. Thomas and P. Neveu, "Comprehensive simulation and optimization of porous SiO₂ antireflective coating to improve glass solar transmittance for solar energy applications."
- [186] A. Aubert, "Matériaux sélectifs pour la conversion photothermique de l'énergie solaire," 1979.
- [187] R. E. Peterson and J. W. Ramsey, "Thin film coatings in solar-thermal power systems," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 1, p. 174, 1975.
- [188] C. H. Trease, H. Hadavinia, and P. E. Barrington, "Solar Selective Coatings : Industrial State-of-the-Art," *Bentham Science Publishers*, pp. 1–19, 2013.
- [189] C. E. Kennedy, "Review of Mid- to High- Temperature Solar Selective Absorber Materials Review of Mid- to High- Temperature Solar Selective Absorber Materials," no. July, 2002.
- [190] J. I. Gittleman, E.K. Sichel, Y. Arie, Composite semiconductors: Selective absorbers of solar energy, *Solar Energy Materials*, Volume 1, Issues 1–2, 1979, Pages 93-104, ISSN 0165-1633,
- [191] W.F. Bogaerts, "Materials for photothermal solar energy conversion," *Mater. Sci.*, vol. 18, pp. 2847–2875, 1983.
- [192] N. Selvakumar and H. C. Barshilia, "Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 98, pp. 1–23, 2012.
- [193] C. Gremion, "Élaboration et caractérisation d'absorbeurs sélectifs platine - alumine pour le solaire thermique à concentration à haute température," Thèse de l'Université de Lyon.
- [194] N. Selvakumar and H. C. Barshilia, "Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high-temperature solar thermal applications," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 98, pp. 1–23, 2012.
- [195] Z. Y. Nuru, D. E. Motaung, K. Kaviyarasu, and M. Maaza, "Optimization and preparation of Pt -Al₂O₃ double cermet as selective solar absorber coatings," *J. Alloys Compd.*, vol. 664, pp. 161–168, 2016.
- [196] S. Esposito, A. Antonaia, M. L. Addonizio, and S. Aprea, "Fabrication and optimisation of highly efficient cermet-based spectrally selective coatings for high operating temperature," *Thin Solid Films*, vol. 517, no. 21, pp. 6000–6006, 2009.
- [197] C. E. Kennedy and H. Price, "Progress in development of high-temperature solar-selective coating," ASME 2005 International Solar Energy Conference, Orlando, Florida, USA, August 6–12, 2005
- [198] Q. Zhang, Y. Yin, and D. R. Mills, "High efficiency Mo-Al₂O₃ cermet selective surfaces for high-temperature application," vol. 40, no. 1996, pp. 43–53, 2006.
- [199] M. Schmidt and F. Schwertfeger, "Applications for silica aerogel products," pp. 364–368, 1998.
- [200] N. Selvakumar, H. C. Barshilia, and S. E. Division, "Solar Energy Materials and Solar Cells (in press) Review of physical vapor deposited (PVD) spectrally selective coatings for mid- and high- temperature solar thermal applications."
- [201] D. W. Berreman, "Infrared Absorption at Longitudinal Optic Frequency in Cubic Crystal Film," *Phys. Rev.*, vol. 130, no. 6, 1963.
- [202] M. Kaltchev and W. T. Tysoe, "An infrared spectroscopic investigation of thin alumina films : measurement of acid sites and surface reactivity," vol. 430, pp. 29–36, 1999.

- [203] W. T. Xie, Y. J. Dai, and R. Z. Wang, "Thermal performance analysis of a line-focus Fresnel lens solar collector using different cavity receivers," *Sol. Energy*, vol. 91, pp. 242–255, 2013.
- [204] Rant Z, "Exergy, a new word for 'technical available work,'" *Tech. High Sch. Virginia*, vol. 22, pp. 36–37, 1956.
- [205] W. A. Hermann, "Quantifying global exergy resources," *Energy*, vol. 31, no. 31, pp. 1685–1702, 2005.
- [206] P. Neveu, *Apports de la thermodynamique pour la conception et l'intégration des procédés*. Université de Perpignan Via Domitia, 2002.
- [207] R. Gicquel, "Mine-ParisTech," 2017. [Online]. Available: <http://direns.mines-paristech.fr>. [Accessed: 20-Oct-2017].
- [208] A. Bejan, "Unification of Three Different Theories Concerning the Ideal Conversion of Enclosed Radiation," *ASME J. Heat Transf.*, vol. 109, no. February 1987.
- [209] R. Petela, "Exergy of Heat Radiation," *ASME J. Heat Transf.*, vol. 86, pp. 187–192, 1964.
- [210] S. J. Jeter, "Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation," *Sol. Energy*, vol. 26, no. 231–236, 1981.
- [211] D. C. Spanner, *Introduction to Thermodynamics*, 1th ed. London and New York : Academic Press, 1964.
- [212] S. E. Wright, M. A. Rosen, D. S. Scott, and J. B. Haddow, "The exergy flux of radiative heat transfer for the special case of blackbody radiation," *Exergy, An International Journal*, vol. 2, pp. 24–33, 2002.
- [213] A. Steinfeld and M. Schubnell, "Optimum aperture size and operating temperature of a solar cavity-receiver," *Sol. Energy*, vol. 50, no. 1, pp. 19–25, 1993.
- [214] N. Rambure, "Mesure des propriétés thermo-optiques aux températures extrêmes," Thèse du Laboratoire d'Energétique, de Mécanique et d'Electromagnétisme, Paris Ouest soutenue le 17 sep. 2010.
- [215] M. Planck, *The theory of heat radiation*. New York: Dover Publication, INC, 1914.
- [216] A. De Vos, "Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells," *Journal of Phycis, Applied Physics*, vol. 13, no. 5, 1980.
- [217] P. Neveu, "Analyse thermodynamique des convertisseurs d'énergie solaire concentrée, Conférence Internationale Francophone d'Energétique et de Mécanique, CIFEM 2018, Coutounou (Benin), 23/25 avril 2018," 2018.
- [218] R. Petela, "Exergy of undiluted thermal radiation," *Sol. Energy*, vol. 74, no. June, pp. 469–488, 2003.
- [219] Y. Candau, "On the exergy of radiation," *Sol. Energy*, vol. 75, pp. 241–247, 2003.
- [220] S. X. Chu and L. H. Liu, "Analysis of terrestrial solar radiation exergy," *Sol. Energy*, vol. 83, no. 8, pp. 1390–1404, 2009.
- [221] S. Meyen, E. Lüpfert, and C. Kennedy, "Standardization of Solar Mirror Reflectance Measurements – Round Robin Test Preprint Aránzazu Fernández-García," no 45. October, 2010.
- [222] H. G. Tompkins, E. A. Irene, C. Hill, and N. Carolina, *Handbook of ellipsometry*.

- [223] F. Goubin, “Relation entre fonction diélectrique et propriétés optiques : application à la recherche d ’ absorbeurs UV inorganiques de deuxième génération,” *Matériaux*. Université de Nantes, 2003. Français. <tel-00003749>
- [224] A. Gombert *et al.*, “Glazing with very high solar transmittance,” *Sol. Energy*, vol. 62, no. 3, pp. 177–188, 1998.
- [225] J. C. Stover, “Scatterometers,” *Handb. Opt. II, Part 3*, p. 26.1-16, 1995.
- [226] F. Sutter, S. Meyen, A. Fernández-García, and P. Heller, “Spectral characterization of specular reflectance of solar mirrors,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 145, pp. 248–254, 2016.
- [227] P.B. Johnson “Optical constants of transition metals: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Pd,” vol. 9, no. 12, pp. 5056–5070, 1974.
- [228] S. M. Werner and C. Ambrosch, “Optical Constants and Inelastic Electron-Scattering Data for 17 Elemental Metals,” vol. 38, no. 4, 2009.
- [229] A. Golovasshkin, I. S. Levchenko, G. P. Motulevich, and A. A. Shubin, “Optical properties of Indium,” vol. 24, no. 6, pp. 1093–1100, 1967.
- [230] Q. Marvi, “Optical constant of minerals and other materials from the millimeter to the ultraviolet,” 1987.
- [231] R. Boidin, V. Nazabal, L. Bene, and N. Petr, “Pulsed laser deposited alumina thin films,” vol. 42, pp. 1177–1182, 2016.
- [232] J. D. T. Kruschwitz and W. T. Pawlewicz, “Optical and durability properties of infrared transmitting thin films,” vol. 36, no. 10, pp. 2157–2159, 1997.
- [233] R. E. Stephens and I. H. Malitson, “Index of Refraction of Magnesium Oxide,” vol. 49, no. 4, pp. 249–252, 1952.
- [234] T. J. Bright, J. I. Watjen, Z. M. Zhang, C. Muratore, and A. A. Voevodin, “Infrared optical properties of amorphous and nanocrystalline Ta₂O₅ thin films,” vol. 83515, 2013.
- [235] C. Stelling, C. R. Singh, M. Karg, T. A. F. König, M. Thelakkat, and M. Retsch, “Plasmonic nanomeshes : their ambivalent role as transparent electrodes in organic solar cells,” *Nat. Publ. Gr.*, no. January, pp. 1–13, 2017.
- [236] D. L. Wood and K. Nassau, “Refractive index of cubic zirconia stabilized with yttria,” vol. 21, no. 16, pp. 2978–2981, 1982.
- [237] M. E. Thomas, *Optical Propagation in Linear Media : Atmospheric Gases and Particles, Solid-State Components, and Water*, Oxford Uni. Oxford, 206AD.
- [238] P. B. Johnson and R. W. Christy. Optical constants of the noble metals, *Phys. Rev. B* **6**, 4370-4379 (1972)

Annexes

Annexes du chapitre I

1.1. Définition des termes optiques

Nous définissons, pour une longueur d'onde ou un spectre solaire donnés [221]:

Pour un flux réfléchi :

- Réflectivité (spectrale), notée ρ , propriété intrinsèque d'un matériau.
- Réflectance (spectrale), notée R , propriété d'un échantillon ou d'une surface particulière de ce matériau. C'est le paramètre mesuré lors d'une caractérisation optique.
- Réflectance solaire, notée R_s , la part d'une densité de flux solaire incidente qui est réfléchi par l'échantillon.

Pour un flux transmis :

- Transmittivité (spectrale), notée τ , propriété intrinsèque d'un matériau.
- Transmittance (spectrale), notée T , propriété d'un échantillon ou d'une surface particulière de ce matériau. C'est le paramètre mesuré lors d'une caractérisation optique.
- Transmittance solaire, notée T_s , la part d'une densité de flux solaire incidente qui est transmise par l'échantillon.

Pour un flux absorbé :

- Absorptivité (spectrale), notée α , propriété intrinsèque d'un matériau.
- Absorbance, notée A_T , le flux lumineux traversant l'échantillon.
- Absorptance (spectrale), notée A , le flux lumineux absorbé par l'échantillon.
- Absorptance solaire, notée A_s , la part d'une densité de flux solaire incident qui est absorbée par l'échantillon.

Pour un flux émis :

- Emissivité (spectrale), notée ε , propriété intrinsèque d'un matériau.
- Emittance (spectrale), notée E , propriété d'un échantillon ou d'une surface particulière de ce matériau. C'est le paramètre mesuré lors d'une caractérisation.
- Emittance corps noir, notée $E_{CN} \times K$ où X est une température exprimée en Kelvins. C'est la part d'une densité de flux émis par un matériau réel, par rapport à ce qu'émettrait un corps noir à la même température.

L'équation de conservation de l'énergie et la loi du rayonnement de Kirchhoff sont utilisées pour lier ces différentes quantités (voir Chapitre I, équation I-2).

1.2. Polarisation

La polarisation est une propriété importante des ondes vectorielles : elle représente une répartition privilégiée dans l'orientation des vibrations qui les composent [222] (Figure 139). En tant qu'onde électromagnétique, la lumière voit son champ électrique et son champ

magnétique osciller simultanément dans deux directions différentes. Pour le comprendre, on décompose la polarisation de la lumière en deux polarisations rectilignes orthogonales entre elles, notées s (de l'allemand « senkrecht » : perpendiculaire) et p (de l'allemand « parallel »). Par convention, la polarisation de la lumière décrit la vibration du champ électrique ($\vec{E}$). La lumière naturelle n'est pas polarisée : les plans d'oscillation sont distribués uniformément autour des axes.

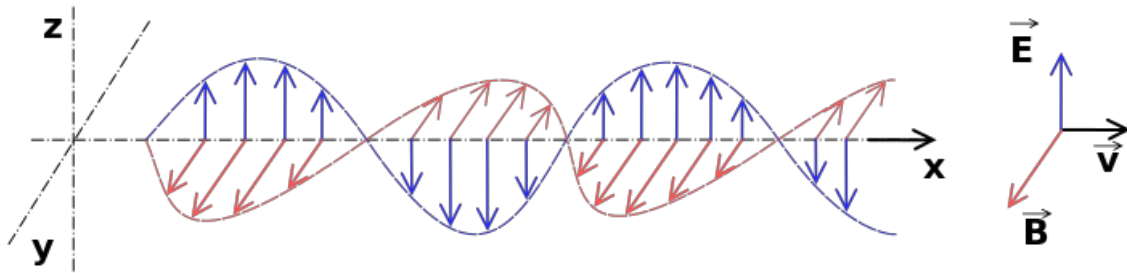


Figure 139 : Onde lumineuse avec un champ magnétique $\vec{B}$ et un champ électrique $\vec{E}$ à angle droit l'un de l'autre [223], [224]

La polarisation de la lumière a un effet important sur la transmission et la réflexion. La réflexion de la lumière sur certains matériaux, comme les métaux, transforme en effet sa polarisation [222], [225]. La lumière est plus ou moins réfléchi selon qu'elle est polarisée s ou p et selon l'angle d'incidence. Les travaux d'Augustin Fresnel [71] montrent qu'il est possible de déterminer la part de rayonnement réfléchi et transmis d'un rayon incident sur une surface, en les décomposant en leurs contributions s et p.

1.3. Fonction diélectrique et conductivité

La lumière est un transport d'énergie sans transport de matière. C'est un ensemble d'ondes électromagnétiques et de particules (photons), de par sa dualité onde-corpuscule. La capacité d'un milieu à répondre à un champ électrique imposé est une propriété physique appelée permittivité diélectrique ε . Un matériau est dit idéal s'il est linéaire, homogène, isotrope et avec une réponse instantanée aux changements du champ électrique. Ainsi, la réponse d'un matériau idéal est un champ d'induction électrique $\vec{D}$ qui représente la façon dont un champ électrique $\vec{E}$ influe sur l'organisation des charges électriques dans ce matériau [223], [222], tel que :

$$\vec{D} = \varepsilon * \vec{E}$$

ε est la permittivité du milieu. Cependant, aucun milieu réel ne peut être considéré comme idéal, sauf le vide qui sert donc de milieu de référence (on note ε_0 la permittivité du vide). La permittivité ε peut alors être exprimée par une quantité adimensionnelle : la permittivité relative ε_r , ou constante diélectrique, normalisée par rapport au milieu de référence.

$$\varepsilon(\lambda) = \varepsilon_0 * \varepsilon_r(\lambda)$$

L'indice de réfraction complexe $N(\lambda)$ d'un matériau réel peut être relié à la constante diélectrique et exprimer également sa capacité à répondre à un champ électrique, par exemple un rayon lumineux, comparé au vide (ε_0).

$$\varepsilon_r(\lambda) = \frac{\varepsilon(\lambda)}{\varepsilon_0} = [N(\lambda)]^2$$

De plus, dans un milieu diélectrique réel, il existe toujours différents mécanismes microscopiques (des défauts notamment) diminuant la conductivité. On parle alors de pertes diélectriques. On peut tenir compte de ces pertes en définissant une constante diélectrique complexe :

$$\varepsilon_r(\lambda) = \varepsilon_1(\lambda) + i * \varepsilon_2(\lambda)$$

De la même manière, l'indice de réfraction complexe $N(\lambda)$ s'exprime en fonction de l'indice de réfraction $n(\lambda)$ et du coefficient d'extinction $k(\lambda)$: $N(\lambda) = n(\lambda) + i.k(\lambda)$. En travaillant algébriquement ces différentes expressions, on peut obtenir une relation entre les constantes diélectriques réelles et imaginaires et l'indice de réfraction complexe.

$$\begin{cases} \varepsilon_1(\lambda) = n(\lambda)^2 - k(\lambda)^2 \\ \varepsilon_2(\lambda) = 2 * n(\lambda) * k(\lambda) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} n(\lambda) = \sqrt{\frac{\varepsilon_1(\lambda) + \sqrt{\varepsilon_1^2(\lambda) + \varepsilon_2^2(\lambda)}}{2}} = \frac{\varepsilon_2(\lambda)}{2 * k(\lambda)} \\ k(\lambda) = \sqrt{\frac{-\varepsilon_1(\lambda) + \sqrt{\varepsilon_1^2(\lambda) + \varepsilon_2^2(\lambda)}}{2}} = \frac{\varepsilon_2(\lambda)}{2 * n(\lambda)} \end{cases}$$

Similairement, la conductivité électrique d'un matériau peut s'écrire comme un nombre complexe. Il est donc possible de la relier également à la constante diélectrique [223].

$$c(\lambda) = c_1(\lambda) + i * c_2(\lambda)$$

$$c_1(\lambda) = \frac{2\pi c}{\lambda} * \varepsilon_0 * \varepsilon_2(\lambda) \Leftrightarrow \varepsilon_2(\lambda) = \frac{c_1(\lambda) * \lambda}{2\pi c * \varepsilon_0}$$

$$c_2(\lambda) = -\frac{2\pi c}{\lambda} * \varepsilon_0 * (\varepsilon_1(\lambda) - 1) \Leftrightarrow \varepsilon_1(\lambda) = 1 - \frac{c_2(\lambda) * \lambda}{2\pi c * \varepsilon_0}$$

L'ensemble de ces équations est particulièrement important pour décrire par différents modèles de physique du solide le comportement de différentes classes de matériaux (Forouhi-Bloer pour les isolants, Drude pour les conducteurs). Il est possible de déterminer l'indice de réfraction complexe d'un matériau, réel ou hypothétique, à partir de données sur sa composition, sa cristallographie, etc. (exemple avec la loi de Nernst-Einstein), et ainsi d'identifier les matériaux les plus adaptés à un type d'application.

Annexes du chapitre II

2.1. Paramétrage du pas d'intégration numérique

Pour notre code de modélisation et d'optimisation des performances solaires, il est nécessaire d'intégrer numériquement une fonction spectrale (réflectance, transmittance ou absorptance) sur le spectre solaire (de 280 à 4000 nm) et dans l'infrarouge (4 à 30 μ m) pour

tenir compte à la fois de l'apport solaire et des pertes thermiques radiatives. Cependant le calcul de chaque point de la fonction spectrale coûte du temps de calcul. Il est donc nécessaire de faire un compromis, notamment en vue de l'optimisation de la fonction spectrale.

Nous avons décomposé le domaine spectral en deux : l'intervalle solaire principal de 280 à 2500 nm et l'intervalle infrarouge (IR) de 2,5 μm à 30 μm . Nous avons réduit l'intervalle solaire à 2500 nm (au lieu de 4000 nm) pour gagner du temps de calcul supplémentaire et parce que ce choix est déjà effectué dans la bibliographie [66], [226]. En effet, au-delà de 2500 nm, les fonctions spectrales sont assez constantes, le spectre solaire ne contient pas ou peu d'énergie et l'irradiance d'un corps noir est peu variable entre deux points. Un pas de discrétisation de 1 nm sur l'ensemble du domaine sert de référence pour calculer les erreurs d'intégration numérique dans chacun des deux domaines. Le temps par processeur indique le temps nécessaire au calcul de la fonction spectrale puis des performances solaires (intégration en longueur d'onde de la fonction spectrale). Les résultats sont contenus dans la Table 43.

Table 43 : Erreur d'intégration numérique d'une fonction spectrale dans le visible et dans l'IR en fonction des pas de discrétisation utilisés

Pas de discrétisation sur gamme solaire : 280 - 2500 nm	Pas de discrétisation sur gamme IR : 2,5 - 30 μm	Nombre total de points	Erreur dans le solaire (%)	Erreur dans l'IR (%)	Temps par processeur (s)
5 nm	200 nm	583	-1,80E-01	-7,40E-04	1,25
5 nm	100 nm	720	-2,60E-01	4,70E-03	1,37
5 nm	50 nm	995	-2,10E-01	1,20E-03	2,18
5 nm	25 nm	1545	-1,60E-01	2,80E-04	4,57
5 nm	10 nm	3195	-1,40E-01	3,50E-05	15,18
5 nm	5 nm	5945	-1,30E-01	4,62E-08	48,64
2 nm	200 nm	1249	8,60E-02	-7,30E-04	2,83
2 nm	100 nm	1386	9,60E-03	4,70E-03	3,39
2 nm	50 nm	1661	5,50E-02	1,20E-03	4,71
2 nm	25 nm	2211	1,00E-01	2,90E-04	7,72
2 nm	10 nm	3861	4,50E-01	1,30E-05	21,55
2 nm	5 nm	6611	1,30E-01	9,90E-06	59,6
1 nm	200 nm	2359	-5,00E-02	-7,30E-04	8,62
1 nm	100 nm	2496	-1,30E-01	4,70E-03	9,62
1 nm	50 nm	2771	-8,10E-02	1,20E-03	11,66
1 nm	25 nm	3321	-3,20E-02	2,90E-04	16,27
1 nm	10 nm	4971	-9,70E-03	4,70E-05	34,57
1 nm	5 nm	7721	1,10E-05	-1,60E-03	79,99
1 nm	1 nm	29721	0	0	1116

Au vu des informations de la Table 43, nous avons choisi un pas de discrétisation de 5 nm dans le visible et de 50 nm dans l'IR. Ce pas nous semble un bon compromis entre une erreur modérée dans le domaine solaire (0,2%) et un temps de calcul raisonnable (2,18 s).

Annexes du chapitre III

3.1. Paramètres de modélisation du spectre solaire ASTM G173-03

La Table 44 donne l'ensemble des paramètres nécessaires à SMARTS-2 pour modéliser les spectres solaires ASTM G173-03 Direct et Circumsolaire (DC) et Global Tilt (GT).

Table 44 : Paramètres utilisés pour modéliser les spectres solaires de référence ASTM G173-03

Paramètre SMARTS-2	Valeur ou nom	Remarque
Pression atmosphérique	1013,25 mbar	Altitude de 0 m
Modèle atmosphérique	USSA 1976	-
Vapeur d'eau	Humidité relative 46,087% Colonne d'eau de 1,4080 cm	(USSA 1976)
Ozone	0,3438 atm/cm soit 343,8 unités Dobson	(USSA 1976)
Pollution	USSA 1976	-
CO ₂	370 ppmv	297 cm sur l'atmosphère
Température sur le site	288,1 K	(USSA 1976)
Spectre AM 0	Gueymard 2004	-
Modèle d'aérosol	S&F Rural	-
Turbidité	AOD à 500 nm de 0,084	-
Angle d'inclinaison	37°, azimut à 180°	Angle d'incidence de 11,236°
Nature du sol	Sol léger	Ratio d'irradiance diffuse isotrope de 0,8993
Domaine spectral	280 à 4000 nm	3 pas : 0,5 nm, 1 nm et 5 nm
Constante solaire	1366,1 W/m ²	Valeur acceptée mondialement
Circumsolaire	Angle d'acceptance de 2,9°	
Emplacement	Air Mass de 1,5	Equivalent à un angle au zénith de 48,2°

La valeur d'AOD à 500 nm de 0,084 est une moyenne sur 15 villes des USA recevant un ensoleillement supérieur à 6 kWh/m²/an (Table 45). L'écart-type des données est de 0,026, ce qui est important par rapport à la valeur moyenne utilisée (0,084). Cet écart illustre la problématique intrinsèque au calcul d'une turbidité moyenne.

Table 45 : Calcul de l'AOD moyen sur l'ensemble des USA [81]

Ville	AOD	Ville	AOD	Ville	AOD
Dagget	0,087	Prescott	0,074	El Paso	0,118
Las Vegas	0,105	Alamosa	0,029	Flastaff	0,074
Tucson	0,099	Albuquerque	0,074	Reno	0,091
Phoenix	0,142	Tonopah	0,082	Cedar City	0,074
Pueblo	0,074	Tucumcari	0,099	Ely	0,05

3.2. Degré de pollution

SMARTS-2 propose quatre degrés de pollution préconfigurés. Les concentrations correspondant aux quatre degrés de pollution sont présentées dans la Table 46.

Table 46 : Composition en ppmv des différents gaz présents dans l'atmosphère en fonction du degré de pollution préconfiguré dans SMARTS-2 [86]

Gaz	Pristine	Light	Moderate	High
CH ₂ O	-0,003	0,001	0,007	0,01
CH ₄	0	0,2	0,3	0,4
CO	-0,1	0	0,35	9,9
HNO ₂	-9,90E-04	0,0005	0,002	0,01
HNO ₃	0	0,001	0,005	0,012
NO	0	0,075	0,2	0,5
NO ₂	0	0,005	0,02	0,2
NO ₃	-4,90E-04	1,00E-05	5,00E-05	2,00E-04
O ₃	-0,007	0,023	0,053	0,175
SO ₂	0	0,01	0,05	0,2

3.3. Paramètres de modélisation des spectres solaires locaux moyens en atmosphères réelles

La Table 47 et la Table 48 donnent tous les paramètres nécessaires à SMARTS-2 pour calculer les spectres solaires locaux des sites de Paranal, Ouarzazate, Sandia, Mezaira, Montsec et Brisbane. Afin d'être réellement adapté aux conditions locales, nous nous affranchissons d'un modèle atmosphérique en suivant les recommandations de Gueymard [86], [82]. En effet, à l'aide de deux exposants Angström centrés sur 500 nm, SMARTS-2 peut déterminer la répartition de taille des particules dans l'aérosol et donc s'affranchir d'un modèle (voir chapitre II §2.1 p.66). Les exposants Angström sont également issus de la base de données AERONET. Nous notons $\check{A}_1$ le coefficient Angström de 340 à 500 nm et $\check{A}_2$ le coefficient de 500 nm à 870 nm. Nous avons choisi un degré de pollution léger (« light ») pour tous les sites, car ils sont éloignés de grands centres urbains (voir §3.2 ci-dessus). Pour la station de Paranal, le degré de pollution choisi est « Pristine » car l'atmosphère y est très pure (ce lieu accueille le Very Large Telescope). Le spectre extraterrestre considéré est le Gueymard 2004 avec une constante solaire de 1366,1 W/m². L'AOD et les deux coefficients Angström ($\check{A}_1$ et $\check{A}_2$) associés sont notés par leurs moyennes $\langle X \rangle$, suivi de leurs écarts-types.

La formule internationale du nivellement barométrique est utilisée pour calculer la pression atmosphérique $p(z)$ à l'altitude z .

$$p(z) = 1013,25 * \left(1 - \frac{0,0065 * z}{288,15}\right)^{5,255}$$

Table 47 : Paramètres des spectres solaires locaux (1)

Grandeur	Unité	Mezaira	Montsec	Ouarzazate
Latitude	°	23°08'N	42°03'N	30°55'N
Longitude	°	53°46'E	00°43'E	06°54'W
DNI	kWh/m ² /an	1900	2000	2400
Pays	-	EAU	Espagne	Maroc
Time zone	UTC	4	0	0
Hémisphère	-	Nord	Nord	Nord
Altitude	m	204	1574	1136

Année des données AERONET	-	2015	2015	2014
Pression atmosphérique	hPa	989	838	884
Température	°C	26°C	6°C	17°C
HCE	atm/cm	1.676	0.495	0.853
AOD à 500 nm	-	<0,21>; 0,058	<0,016>;0,004	<0,062>;0,04
Å ₁ < 500 nm	-	<1,16>; 0,19	<1,19>;0,43	<1,06>;0,30
Å ₂ > 500 nm	-	<0,92>; 0,29	<1,07>;0,17	<0,52>;0,17
Pollution	SMARTS-2	Light	Light	Light
AM	-	1,455	2,399	1,714
Irradiance	W/m ²	828	961	958

Table 48 : Paramètres des spectres solaires locaux (2)

Grandeur	Unité	Sandia	Paranal	Brisbane
Latitude	°	35°03'N	24°42'S	27°29'S
Longitude	°	106°32'W	70°19'W	153°00'E
DNI	kWh/m ² /an	2600	3800	1700
Pays	-	USA	Chili	Australie
Time zone	UTC	-7	-4	8
Hémisphère	-	Nord	Sud	Sud
Altitude	m	1662	2154	45
Année	-	2015	2016	2013
Pression atmosphérique	hPa	829	780	1008
Température	°C	6°C	10°C	21,6°C
HCE	atm/cm	0,398	0,245	1,226
AOD à 500 nm	-	<0,025>;0,009	<0,017>;0,005	<0,02>;0,012
Å ₁ < 500 nm	-	<1,67>;0,32	<1,52>;0,24	<2,35>;0,75
Å ₂ > 500 nm	-	<0,40>;0,39	<0,86>;0,19	<1,68>;0,70
Pollution	SMARTS-2	Light	Pristine	Light
AM	-	1,908	1,417	1,584
Irradiance	W/m ²	1014	1040	920

3.4. Irradiance spectrale temporelle

Nous avons modélisé avec SMARTS-2 (atmosphère USSA) l'évolution du spectre solaire sur une journée. Le facteur AM varie au cours de la journée, avec la position du soleil dans le ciel. Les coordonnées choisies sont celles de Kramer Junction (K-J) en Californie aux USA, proche des centrales cylindro-paraboliques SEGS III à V. Le facteur AM est calculé à partir de l'angle au zénith solaire θ_s , lui-même obtenu à partir des coordonnées du lieu, du jour de l'année et de l'heure selon l'équation suivante.

$$\cos(\theta_s) = \sin(\Phi) * \sin(\delta) + \cos(\Phi) * \cos(\delta) * \cos(h)$$

L'angle au zénith solaire θ_s représente l'angle entre la position du centre du disque solaire et le zénith. Il est fonction de trois angles : la latitude du lieu, souvent fournie par la

bibliographie (notée Φ), l'heure exprimée par l'angle solaire horaire (notée h) et le jour de l'année exprimé par la déclinaison solaire (notée δ) [82].

L'angle solaire horaire h représente l'angle entre la position du soleil et le zénith. Il s'exprime en fonction de l'heure locale (notée h_L).

$$h = \frac{h_L - 12}{360^\circ}$$

La déclinaison solaire δ est l'angle formé par la droite reliant la Terre au Soleil et le plan équatorial terrestre. Sa valeur est fonction du jour de l'année (noté N_j).

$$\delta = \text{asin} \left[\sin(-23.44^\circ) * \cos \left[\frac{360^\circ}{365.24} (N_j + 10) \right] + \frac{360^\circ}{\pi} * 0.0167 * \sin \left[\frac{360^\circ}{365.24} (N_j - 2) \right] \right]$$

La Figure 140 montre les spectres solaires en fonction de l'heure locale pour la journée du 21 juin (solstice d'été) et illustre la grande disparité d'irradiance spectrale obtenue au cours d'une même journée.

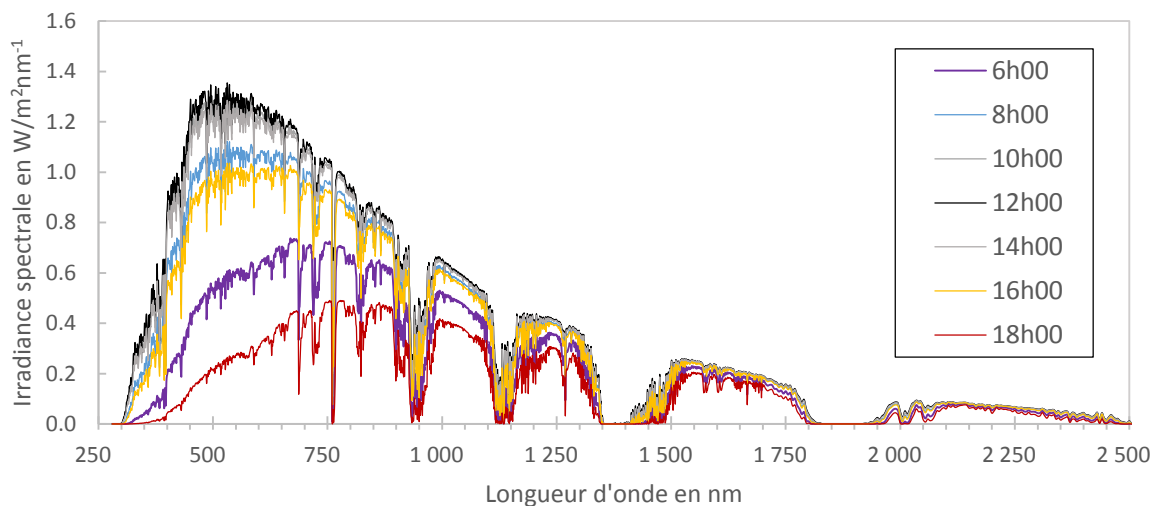


Figure 140 : Spectre solaire en fonction de l'heure locale pour Kramer Junction

Annexes du chapitre IV

4.1. Couches réfléchrices métalliques

Bicouches Al/Ag : transmittance spectrale

Nos résultats montrent que les empilements à deux couches minces métalliques Al/Ag ont une meilleure réflectance solaire que des monocouches Ag seules. Un bicouche Al (133 nm) / Ag (39 nm) a été en particulier identifié par optimisation en maximisant la réflectance solaire (Table 12, p.121). La réflectance solaire de ce miroir bicouche optimisé est de 95,85%, soit 0,35% de gain par rapport à un miroir d'argent seul (95,5%). Ce gain s'explique par la

transmittance spectrale non nulle des couches d'argent pour des faibles épaisseurs (quelques dizaines de nanomètres) dans les UV et le proche visible (250 à 500 nm), comme illustré sur la Figure 141.

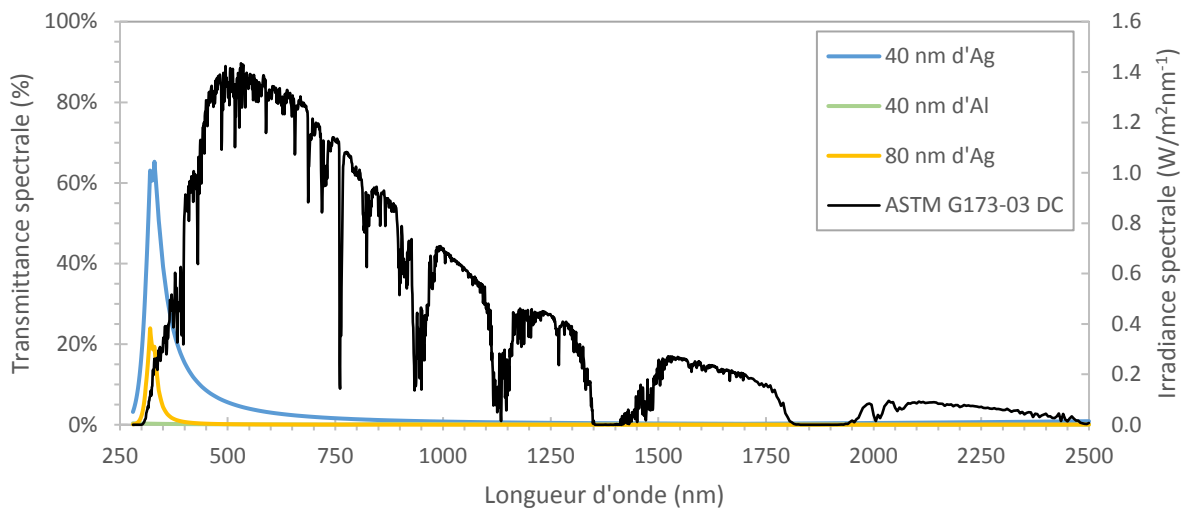


Figure 141 : Transmittance spectrale de couches minces d'argent et d'aluminium de différentes épaisseurs

Pour une épaisseur de la couche d'argent de 40 nm, une partie du rayonnement (aire sous la courbe bleue) est transmise vers la couche d'aluminium située en dessous et est en grande partie réfléchi par cette dernière. En effet, l'aluminium est beaucoup plus opaque, comme le montre la courbe verte. Le rayonnement retransverse donc la couche d'argent de 40 nm pour ressortir de l'empilement. Au total, le gain de réflectance sera approximativement égal à la transmittance solaire d'une couche de 80 nm d'argent (soit deux fois 40 nm traversés par le rayonnement), soit 0,35% de la densité de flux solaire incidente.

Empilements utilisant plus de deux métaux

On peut imaginer que des réflectances solaires plus élevées pourraient être atteintes grâce à des empilements de plus de deux couches métalliques. Cependant pour que cette architecture plus complexe revête un intérêt, la couche superficielle doit être partiellement transparente, afin que les couches inférieures voient une partie du rayonnement incident et deviennent optiquement utiles, comme illustré par le cas du bicouche Al/Ag ci-dessus.

La Table 49 illustre la réflectance, la transmittance et l'absorptance solaires de couches de 20 nm d'épaisseur de plusieurs métaux.

Table 49 : Propriétés optiques solaires de couches minces métalliques de 20 nm d'épaisseur

	Ag	Al	Au	W	V	Mo	Cr
R_s	71,73%	87,61%	71,29%	42,25%	44,90%	51,93%	40,89%
T_s	21,77%	1,67%	9,39%	13,59%	11,67%	9,34%	12,71%
A_s	6,50%	10,71%	19,32%	44,16%	43,44%	38,73%	46,40%

A cette épaisseur, l'aluminium est le métal le moins transparent ($T_s = 1,67\%$) sur la gamme solaire, tandis que l'argent est le plus transparent ($T_s = 21,77\%$). Pour créer des empilements réflecteurs à plus de deux couches minces métalliques pertinents, il est impératif de sélectionner deux couches supérieures transparentes afin que le rayonnement soit transmis. L'argent, l'or, le vanadium et le tungstène sont de bons candidats. Cependant, hormis l'argent, ils ont tous les trois une forte absorptance, ce qui engendre des pertes optiques. A titre d'illustration, nous avons étudié la réflectance solaire d'empilements à trois couches minces (Table 50). Les couches sont numérotées du substrat vers le milieu ambiant tel que l'empilement soit : substrat/couche n°1/couche n°2/couche n°3/air. Comme l'aluminium est le plus opaque des métaux, il sera utilisé en couche n°1. L'argent, métal le plus réflecteur, sera utilisé sur la couche en contact avec l'air (couche n°3). La Table 50 montre les épaisseurs optimisées avec notre algorithme pour maximiser la réflectance solaire.

Table 50 : Réflectance et absorptance solaires d'empilements de trois couches minces métalliques

Couche n°1	Couche n°2	Couche n°3	Epaisseur n°1	Epaisseur n°2	Epaisseur n°3	R_s	A_s
Al	-	-	125,7 nm	-	-	92,18%	7,82%
Ag	-	-	123,4 nm	-	-	95,50%	4,50%
Al	Ag	-	132,7 nm	39,0 nm	-	95,85%	4,15%
Al	Au	Ag	128,6 nm	0,45 nm	39,1 nm	95,84%	4,16%
Al	W	Ag	129,4 nm	0,42 nm	39,0 nm	95,85%	4,15%
Al	V	Ag	134,8 nm	0,37 nm	38,9 nm	95,84%	4,16%

La réflectance solaire d'un bicouche aluminium/argent est de 98,85%, elle servira de valeur de référence. Pour des tricouches Al/métal/Ag, nous ne dépassons pas cette performance limite. L'épaisseur de la couche intermédiaire (couche n°2) tend vers zéro, si bien que le code d'optimisation tente de ramener le tricouche à un bicouche. Nous avons observé ce phénomène pour tous les empilements multicouches métalliques simulés maximisant la réflectance solaire : l'optimisation ramène toujours l'empilement à un système à deux couches argent sur aluminium, qui est donc bien le système le plus performant.

Multicouches métalliques périodiques

En nous inspirant des réflecteurs de Bragg (multicouches diélectriques périodiques, voir chapitre IV, paragraphe 3.2 p.122), nous avons également étudié les performances optiques de multicouches métalliques périodiques : un bicouche (une période) constitué de deux matériaux différents d'épaisseur fixe est répété plusieurs fois (nombre de périodes). La Figure 142 illustre le cas d'un empilement périodique Ag/Al.

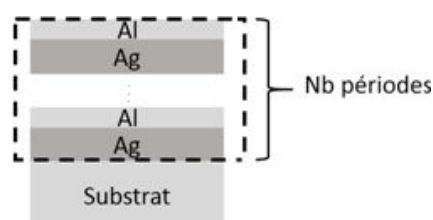


Figure 142 : Principe des multicouches métalliques périodiques, cas d'un bicouche Ag/Al

Les épaisseurs fixes des deux couches et le nombre de périodes ont été optimisés grâce à l'algorithme présenté dans le chapitre II afin de maximiser la réflectance solaire. La Figure 143 illustre la réflectance spectrale de cet empilement optimisé. Il apparaît que pour les empilements métal/métal, la réflectance solaire est proche de celle du métal le moins réflecteur : dans le cas Ag/Al, R_s vaut 92,35%, soit une valeur proche de celle d'un miroir Al (92,2%). Cette solution n'est donc pas adaptée. Des multicouches métalliques périodiques ne constituent pas de meilleurs réflecteurs solaires que des monocouches métalliques.

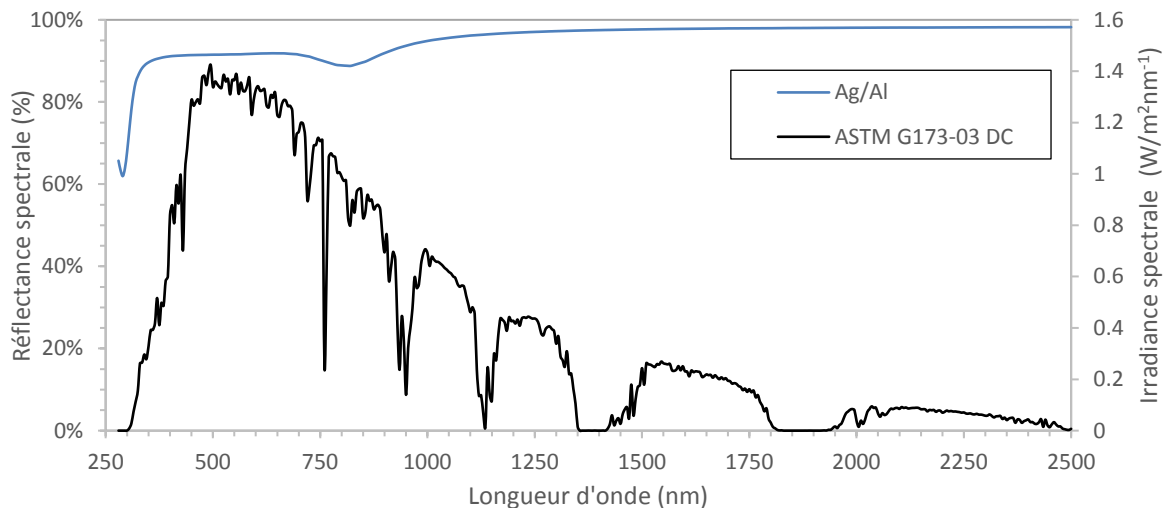


Figure 143 : Réflectance de l'empilement Ag/Al périodique

Couches métalliques composites

En utilisant les modèles EMA (Effective Medium Approximation, sommairement une loi de mélange entre deux matériaux) décrits dans le chapitre I (§5.4, p.58), nous avons étudié la réflectance solaire d'un composite constitué de deux métaux, comme par exemple une couche composite argent-aluminium. Les solutions composites sont une voie d'économie des métaux précieux, en réduisant par exemple la quantité d'argent nécessaire pour obtenir une réflectance solaire élevée.

Nos calculs montrent qu'aucun mélange étudié, parmi de nombreuses simulations basées sur dix métaux (Ag, Al, Au, Cr, Cu, V, Mo, W, Ni, Ti), ne permet d'augmenter les performances solaires au-delà de celles de l'argent seul (réflectance solaire de 95,5%). La réflectance solaire d'un composite est en fait proche de celle du plus mauvais réflecteur. La Figure 144 donne l'exemple de la réflectance solaire d'un composite argent-aluminium en fonction du taux d'argent dans le composite, comparée à celle des deux métaux purs pris séparément. Un composite 90% d'argent – 10% d'aluminium présente une réflectance solaire de 94,6%, soit déjà 0,9% de réflectance perdue avec seulement 10% d'aluminium dans le composite, par rapport à l'argent pur. Cette solution composite n'est donc pas adaptée pour fabriquer des miroirs solaires performants. L'économie de matière en métal précieux ne peut compenser la forte chute de performance.

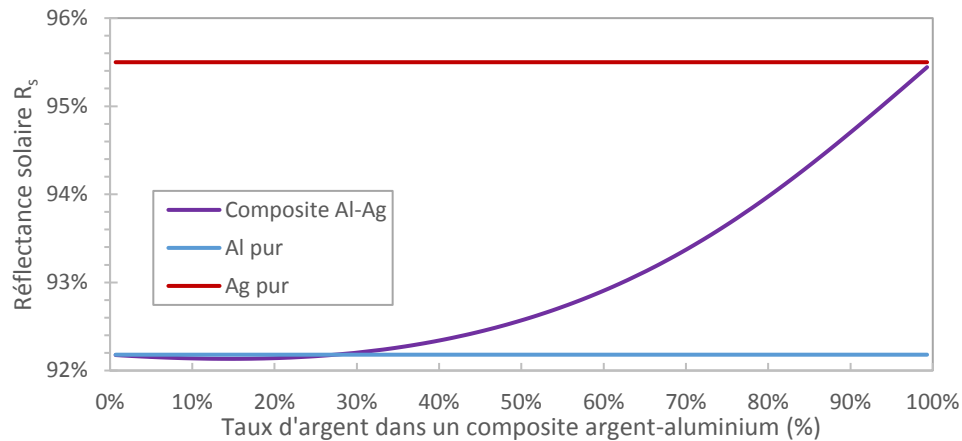


Figure 144 : Réflectance solaire d'un miroir composite argent-aluminium en fonction du taux d'argent, comparée à la réflectance solaire de l'argent et de l'aluminium purs

4.2. Multicouches réflectrices périodiques mixtes diélectrique/métal

En nous inspirant d'un réflecteur de Bragg (voir chapitre IV §3.2 p.122), nous avons également exploré le concept de couches réflectrices multicouches mixtes utilisant des alternances de métaux et de diélectriques. La Figure 145 illustre le cas d'un empilement métal/diélectrique Al/SiO₂. La Figure 146 montre quant à elle la réflectance spectrale d'un empilement Ag/SiO₂ dont les épaisseurs et le nombre de couches ont été optimisés pour maximiser la réflectance solaire. Les empilements métal/diélectrique ne semblent pas être efficaces. L'exemple d'un bicouche Ag/SiO₂ mène en effet à une réflectance solaire proche de 75% seulement.

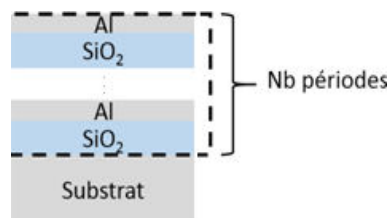


Figure 145 : Principe des multicouches métal/diélectrique périodiques, cas d'un bicouche Al/SiO₂

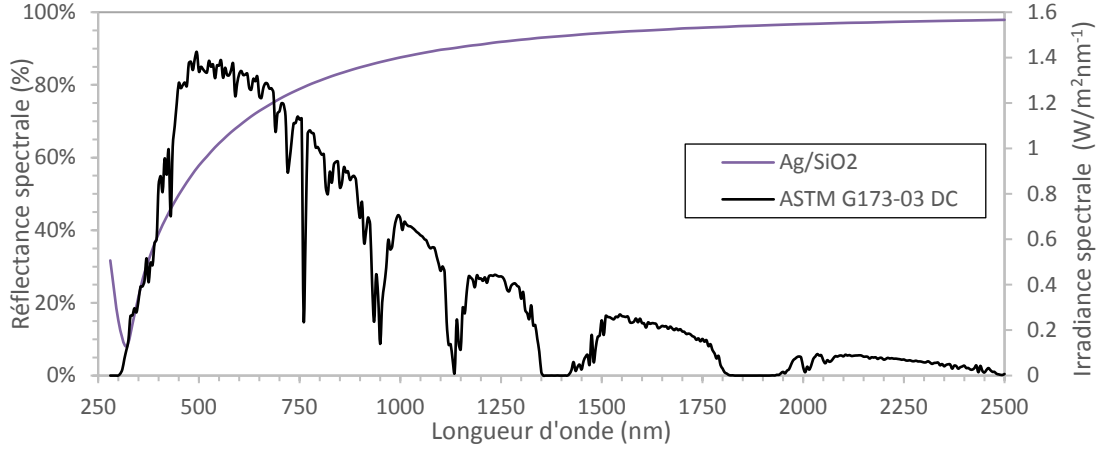


Figure 146 : Réflectance de l'empilement Ag/SiO₂ périodique

Annexes du chapitre V

5.1. Solutions théoriques d'antireflets bicouches

Pour les antireflets bicouches (chapitre V, Figure 83 p.165), la théorie expliquant comment observer une réflectance nulle à une longueur d'onde donnée est développée dans la bibliographie [72]. Considérons un antireflet bicouche (matériaux d'indices n_1 et n_2) déposé sur un substrat (d'indice n_s) dans un milieu ambiant (d'indice n_0). Il est possible d'observer une réflectance nulle à une longueur d'onde donnée seulement si l'angle d'incidence du rayonnement (ϕ_j) est normal (0°). De même, l'indice de réfraction des différents matériaux doit être sans partie complexe ($k = 0$). Ainsi les équations écrites dans le chapitre II (équation (II-5), §3.1 p.72) donnant les amplitudes relatives de l'onde selon les deux polarisations (q^s et q^p) et la différence de phase (θ_j) pour une couche j d'épaisseur d_j , à la longueur d'onde λ , peuvent se simplifier comme suit :

$$q_j^s = q_j^p = n_j \quad \theta_j = \frac{2\pi}{\lambda} d_j n_j$$

La matrice de transfert pour l'empilement (équation (II-6)) devient alors :

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^2 \begin{pmatrix} \cos \theta_j & -\frac{i}{n_j} \sin \theta_j \\ -i n_j \sin \theta_j & \cos \theta_j \end{pmatrix} \quad (\text{A-1})$$

On retrouve alors une amplitude de réflexion donnée par :

$$r^{s,p} = \frac{n_0 m_{11} - n_s m_{22} + n_0 n_s m_{12} - m_{21}}{n_0 m_{11} + n_s m_{22} + n_0 n_s m_{12} + m_{21}} \quad (\text{A-2})$$

La puissance réfléchie (réflectance) par le système est nulle quand les amplitudes réfléchies données par l'équation (A-2) sont égales à zéro. Cela correspond à deux conditions.

$$\begin{cases} n_0 m_{11} = n_s m_{22} \\ n_0 n_s m_{12} = m_{21} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} n_0 = \sqrt{\frac{m_{21} m_{22}}{m_{11} m_{12}}} \\ n_s = \sqrt{\frac{m_{11} m_{21}}{m_{12} m_{22}}} \end{cases}$$

A partir de ces deux conditions et des deux matrices de transfert (équation (A-1), une matrice par polarisation s ou p), nous obtenons trois systèmes de solutions, qui lient directement l'indice de réfraction des deux couches minces antireflet transparentes (n_1 et n_2) à l'indice du substrat (n_s) et l'indice du milieu ambiant (n_0), pour lesquelles la réflexion peut être nulle.

$$\begin{cases} n_1 = n_0^{2/3} n_s^{1/3} \\ n_2 = n_0^{1/3} n_s^{2/3} \end{cases} \quad \begin{cases} n_1 = n_0^{2/3} n_s^{1/3} \\ n_2 = n_1 \sqrt{n_s/n_0} \end{cases} \quad \begin{cases} n_1 = n_0^{1/3} n_s^{2/3} \\ n_2 = n_1 \sqrt{n_0/n_s} \end{cases} \quad (\text{A-3})$$

Cela permet d'obtenir trois solutions exactes, fournies dans la Table 51 pour $n_0 = 1$ (air ou vide) et $n_s = 1,51$ (verre BK7[®]) [72]. Elles sont parfois nommées dans la bibliographie par la forme des courbes de réflectance qui en découlent, en « U » (un minimum de réflexion) ou en « W » (deux minima) [179]. Ces solutions correspondent à un gradient d'indice de réfraction difficile à mettre en place pratiquement en raison des valeurs faibles d'indice de réfraction requises. On peut donc voir qu'il est difficile d'obtenir une réflexion parfaitement nulle à une longueur d'onde donnée avec un antireflet bicouche.

Table 51 : Solutions exactes donnant $\rho(\lambda) = 0$ avec un antireflet bicouche pour $n_0 = 1$ et $n_s = 1,51$

Solution n°	Allure de la courbe	n_1	n_2
1	W	1,1473	1,3161
2	U	1,1473	1,4098
3	U	1,0710	1,3161

D'après nos simulations, une couche d'indice $n_2 \approx 1,13$ couplée une autre couche d'indice $n_1 \approx 1,32$ sur substrat d'indice de réfraction ($n_s = 1,51$) semble être le meilleur compromis pour maximiser la transmittance solaire (voir chapitre V, §4.3 p.167). Dans la Table 51, cela correspond à la solution n°1, soit une courbe de réflectance en « W » (c'est-à-dire présentant deux minima à deux longueurs d'onde différentes), qui est donc la forme la mieux adaptée pour maximiser la transmission du spectre solaire complet (280 – 2500 nm). Un exemple de bicouche optimisé est illustré sur la Figure 85 p.168 avec son spectre de réflectance. La transmittance solaire deux faces correspondante est de 98,82%.

5.2. Phénomène de réflexion totale

Il existe un angle d'incidence critique au-delà duquel un rayonnement n'est plus transmis, mais réfléchi intégralement (réflexion totale). Ce phénomène est exprimé par la loi de Snell-Descartes (équation (A-4)) qui permet d'exprimer cet angle (θ_{ri}) en fonction de l'indice de réfraction des deux milieux de chaque côté de l'interface, n_0 (ambiant) et n_{CAR} (couche antireflet superficielle).

$$\theta_{rt} = \text{asin}\left(\frac{n_0}{n_{CAR}}\right) \quad (\text{A-4})$$

Par exemple, pour un indice de réfraction de la couche antireflet de $n = 1,23$ (SiO_2 de porosité 50%), cet angle est de 54° . Au-delà de cette valeur limite, l'intégralité du rayonnement sera réfléchi et non transmis.

Annexes du chapitre VI

6.1. Références bibliographiques des indices de réfraction complexes

Les Table 52 et Table 53 contiennent les références bibliographiques utilisées pour les indices de réfraction complexes ($N = n + ik$) des matériaux métalliques et diélectriques étudiés dans le chapitre VI, notamment les domaines spectraux considérés dans ces références. Nos critères de sélection des études bibliographiques sont décrits dans le chapitre II (§3.3.1, p.81). Lorsque plusieurs études correspondent à nos critères, celles-ci sont mentionnées dans la colonne « Bibliographie », mais nous avons noté dans la colonne « Auteur(s) » les données avec lesquelles nous avons travaillé.

Table 52 : Bibliographie pour les indices de réfraction complexes des métaux

Matériaux	Domaine	Auteur(s)	Année	Bibliographie
Ag	0,248-12,4 μm	Rakic et al	1998	[123], [127], [101]*
Al	0,248-12,4 μm	Rakic et al	1998	[123], [101]*
Au	0,248-12,4 μm	Rakic et al	1998	[123], [127], [101]*
Co	0,01759-2,48 μm	Werner et al	2009	[227], [228]
Cr	0,248-12,4 μm	Rakic et al	1998	[123], [227]
Cu	0,248-12,4 μm	Rakic et al	1998	[123], [127]
Fe	0,01759-2,48 μm	Werner et al	2009	[227]
In	0,55-10 μm	Golovashkin	1967	[229]**
Ir	0,667-286 μm	Ordal et al	1988	[124]**
Mo	0,01759-2,48 μm	Werner et al	2009	[227]
Mn	0,248-12,4 μm	Rakic et al	1998	[123], [227]
Ni	0,01759-2,48 μm	Werner et al	2009	[227]
Pb	0,01759-2,48 μm	Werner et al	2009	[227]
Pd	0,248-12,4 μm	Rakic et al	1998	[123], [227]
Pt	0,248-12,4 μm	Rakic et al	1998	[123]
Sn	0,73-12 μm	Golovashkin	1964	[229]**
Ta	0,01759-2,48 μm	Werner et al	2009	[227]
Ti	0,248-12,4 μm	Rakic et al	1998	[123], [227]
V	0,01759-2,48 μm	Werner et al	2009	[227]
W	0,248-12,4 μm	Rakic et al	1998	[123]
Zn	0,01759-2,48 μm	Werner et al	2009	[227]
Zr	0,22-55,6 μm	Querry	1987	[230]

Table 53 : Bibliographie pour les indices de réfraction complexes des diélectriques

Matériaux	Domaine	Auteur(s)	Année	Bibliographie
------------------	----------------	------------------	--------------	----------------------

Al₂O₃	0,16-18 μm	Boidin et al	2016	[231], [144]
AlN	1,54-14,29 μm	Kischkat et al	2012	[145]**
CaF₂	0,138-2,326 μm	Daimon and Masumara	2002	[173]
Cr₂O₃	0,6-12 μm	Kruschwitz et al	1997	[232]
MgF₂	0,2-7 μm	Dodge et al	1984	[133]
MgO	0,36-5,4 μm	Stephens & Malitson	1952	[233]
Si₃N₄	1,54-14,29 μm	Kischkat et al	2012	[145]**
SiCH	0,28-2,5 μm	Di Giacomo	2017	[103]
SiNCH	0,28-2,5 μm	Plujat	2017	[180]
SiO₂	0,25-2,5 μm	Lemarchand et al	2013	[144]
Ta₂O₃	0,5-1000 μm	Bright et al	2013	[234]
TiO₂	1,54-14,29 μm	Kischkat et al	2012	[145]**
ZnO	0,302-1,685 μm	Stelling et al	2017	[235]***
ZrO₂	0,350-5,1 μm	Wood and Nassau	1982	[236]

Notes

* : Pour ces trois métaux, les études peuvent être séparées en deux groupes. Les indices de réfraction de Rakic [123] sont ceux utilisés, notamment dans le chapitre IV sur les réflecteurs solaires. Ils sont obtenus par des modélisations avec les modèles de Brendel-Bromann ou de Lorentz-Drude. Les indices de réfraction de McPeak [101] sont obtenus par caractérisation d'échantillons déposés dans des conditions très particulières, propres au domaine plasmonique, que nous ne jugeons pas compatibles avec des échantillons de grande taille.

** : Pour ces matériaux, les indices de réfraction disponibles dans la littérature issus de caractérisations ne sont pas parfaitement compris dans le domaine solaire. Nous avons calculé la partie manquante grâce à un modèle d'oscillateurs multiples. Les données nécessaires (fréquences des oscillateurs) pour chaque matériau ont été obtenues dans un ouvrage [237].

*** : Pour le ZnO, nous avons démarré nos travaux avec les indices de réfraction complexes de Query [238]. A la fin de la thèse (2017), une nouvelle étude plus récente était disponible [235]. Nous avons comparé les résultats obtenus avec les deux jeux d'indices de réfraction et ceux-ci ne montrent aucune différence dans les performances solaires, seulement des variations nanométriques dans les épaisseurs optimisées des couches minces.

6.2. Empilements spectralement sélectifs étudiés

La Table 54 rassemble les différents empilements spectralement sélectifs prospectés. Ils sont constitués de trois couches minces : une couche métallique, une couche de cermet (composite métal-diélectrique, de fraction volumique VF) et une couche de diélectrique qui joue le rôle d'antireflet (CAR), le tout déposé sur un substrat de fer, qui ne joue aucun rôle optiquement. Les rendements héliothermiques (rH) sont classés par ordre de performance et sont donnés pour une concentration de 80 et une température d'absorbeur de 823 K (550°C).

Table 54 : Empilements spectralement sélectifs pour $C = 80$ et $T = 823$ K (550°C) classés selon leur rendement héliothermique

Métal	Cermet	CAR	Absorptance solaire As	Emittance ECN 823 K	rH	Epaisseur Métal	Epaisseur Cermet	Epaisseur CAR	VF cermet
Zr	Ta-SiO ₂	SiO ₂	95,8%	7,21%	92,18%	146 nm	108 nm	70 nm	22,8%
V	V-AlN	SiO ₂	95,0%	6,22%	91,83%	164 nm	91 nm	70 nm	22,7%
Mo	Au-SiO ₂	SiO ₂	94,1%	4,60%	91,80%	117 nm	88 nm	74 nm	22,9%
Au	Au-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	94,1%	5,41%	91,33%	145 nm	83 nm	64 nm	22,6%
W	Au-SiO ₂	SiO ₂	94,0%	5,56%	91,20%	166 nm	84 nm	72 nm	22,1%
W	Co-SiO ₂	SiO ₂	95,2%	7,95%	91,19%	155 nm	91 nm	75 nm	22,3%
Au	Au-MgO	MgF ₂	93,3%	4,64%	90,99%	135 nm	79 nm	89 nm	21,6%
Au	Au-MgO	MgO	93,6%	5,54%	90,82%	122 nm	80 nm	59 nm	22,4%
Nb	Nb-SiO ₂	SiO ₂	95,2%	9,40%	90,46%	139 nm	101 nm	77 nm	23,2%
Ag	Ag-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	92,8%	4,63%	90,45%	164 nm	80 nm	57 nm	21,9%
W	Mo-SiO ₂	SiO ₂	94,5%	8,46%	90,25%	161 nm	93 nm	81 nm	23,1%
Al	Al-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	92,2%	3,99%	90,22%	141 nm	71 nm	70 nm	25,3%
W	Mo-Al ₂ O ₃	SiO ₂	94,2%	7,85%	90,21%	172 nm	82 nm	84 nm	21,8%
Ni	Co-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	94,0%	7,95%	89,96%	152 nm	84 nm	66 nm	23,7%
Al	Al-SiO ₂	SiO ₂	91,8%	3,86%	89,86%	156 nm	76 nm	80 nm	26,0%
Mo	Mo-Al ₂ O ₃	SiO ₂	93,2%	7,13%	89,57%	154 nm	88 nm	85 nm	22,5%
Mo	Pt-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	93,5%	8,10%	89,43%	162 nm	80 nm	65 nm	24,7%
W	Cu-SiCH	SiO ₂	92,0%	5,26%	89,29%	156 nm	71 nm	82 nm	16,9%
Mo	Mo-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	92,9%	8,00%	88,80%	170 nm	91 nm	71 nm	22,7%
W	W-Si ₃ N ₄	SiO ₂	92,1%	6,59%	88,78%	153 nm	51 nm	94 nm	16,0%
W	W-Al ₂ O ₃	MgF ₂	92,8%	8,34%	88,53%	158 nm	83 nm	94 nm	21,4%
Al	Al AlN	AlN	90,6%	4,34%	88,37%	116 nm	60 nm	52 nm	24,0%
Ni	Ni-SiO ₂	SiO ₂	95,0%	13,14%	88,34%	169 nm	96 nm	74 nm	23,2%
W	W Al ₂ O ₃	SiO ₂	92,9%	9,12%	88,23%	174 nm	83 nm	85 nm	21,9%
W	W-SiO ₂	SiO ₂	90,8%	5,11%	88,19%	189 nm	85 nm	67 nm	21,2%
V	V-AlN	SiO ₂	92,3%	8,29%	88,12%	162 nm	64 nm	89 nm	20,2%
Pt	Pt-SiO ₂	SiO ₂	94,6%	13,34%	87,88%	159 nm	89 nm	76 nm	24,4%
W	W-TiO ₂	SiO ₂	90,9%	6,27%	87,72%	162 nm	49 nm	92 nm	16,5%
V	V AlN	Al ₂ O ₃	92,4%	9,46%	87,65%	140 nm	64 nm	76 nm	21,7%
Ni	Co-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	94,1%	13,38%	87,32%	148 nm	80 nm	65 nm	23,5%
Ni	Ni-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	94,1%	13,84%	87,05%	147 nm	86 nm	62 nm	22,7%
V	V-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	92,6%	11,00%	87,04%	149 nm	84 nm	69 nm	23,5%
Pt	Pt-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	94,0%	14,10%	86,83%	176 nm	80 nm	65 nm	24,1%
W	W-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	91,4%	9,00%	86,82%	165 nm	71 nm	73 nm	41,6%
Zr	Zr-SiO ₂	SiO ₂	94,5%	15,83%	86,49%	3 nm	83 nm	75 nm	28,3%
W	W-SiCH	SiCH	89,7%	7,63%	85,88%	150 nm	65 nm	59 nm	45,8%
W	Mo-AlN	AlN	89,6%	7,95%	85,62%	166 nm	59 nm	47 nm	21,2%
Zr	Zr-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	94,2%	16,97%	85,55%	7 nm	73 nm	64 nm	28,9%
Zr	Ta-Ta ₂ O ₃	Ta ₂ O ₃	89,7%	8,25%	85,55%	145 nm	83 nm	39 nm	20,2%
Cr	Cr-SiO ₂	SiO ₂	94,6%	17,91%	85,49%	31 nm	84 nm	75 nm	26,3%
Al	Al-Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	87,7%	5,16%	85,04%	137 nm	52 nm	41 nm	23,4%
Cr	Cr-Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	94,1%	18,30%	84,82%	24 nm	72 nm	64 nm	28,7%
W	W-Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	86,9%	6,28%	83,76%	159 nm	56 nm	45 nm	54,3%
V	V-Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	87,4%	7,28%	83,76%	164 nm	54 nm	43 nm	52,1%
Al	Cr-Cr ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	87,8%	8,09%	83,74%	143 nm	62 nm	40 nm	53,0%

W	Cr-Cr ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	88,0%	9,06%	83,40%	161 nm	44 nm	38 nm	42,6%
Mo	Mo-Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	86,2%	5,67%	83,32%	162 nm	61 nm	43 nm	48,1%
Mo	Mo-Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	86,2%	5,67%	83,32%	162 nm	61 nm	43 nm	48,1%
Cu	Cr-Cr ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	87,5%	11,50%	81,72%	94 nm	53 nm	40 nm	56,0%
Zr	Zr-ZrO ₂	ZrO ₂	90,1%	16,61%	81,71%	9 nm	52 nm	44 nm	33,2%
TiN	TiN-AlN	AlN	90,7%	19,11%	81,01%	3 nm	77 nm	43 nm	26,6%
Cr	Cr-Cr ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	88,1%	14,79%	80,64%	12 nm	44 nm	39 nm	49,8%
TiN	TiN-AlN	AlN	90,7%	20,21%	80,42%	7 nm	77 nm	43 nm	27,2%
Ti	Ti-Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	87,8%	15,44%	80,03%	4 nm	48 nm	30 nm	36,7%
Zn	Zn-ZnO	ZnO	82,9%	6,26%	79,70%	133 nm	35 nm	66 nm	34,6%
Zn	Zn-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	83,2%	7,07%	79,63%	154 nm	42 nm	82 nm	32,0%
Zn	Zn-SiO ₂	SiO ₂	81,6%	6,48%	78,30%	154 nm	49 nm	93 nm	30,9%

Le rendement héliothermique varie de 92,2% pour un empilement Zr/Ta-SiO₂/SiO₂ à 78,3% pour un empilement Zn/Zn-SiO₂/SiO₂. Dans ces deux exemples diamétralement opposés, le matériau diélectrique utilisé dans le cermet et dans la couche antireflet est identique : SiO₂. La différence provient des métaux utilisés (Zr, Ta, et Zn). Comme expliqué dans le paragraphe 3.1 page 204 du chapitre VI, les performances d'un empilement spectralement sélectif ne sont pas dues uniquement à la somme des performances optiques des couches minces le composant. Les performances de l'empilement sont majoritairement dues aux interactions des couches minces entre elles et donc à la totalité de l'empilement.

6.3. Effet de l'incertitude sur l'épaisseur des couches déposées

Nous présentons ici les résultats complémentaires obtenus lors de l'étude sur l'effet de l'incertitude en épaisseur dans les empilements sélectifs, concernant deux autres empilements (Figure 147) : une double alternance cermet/diélectrique W-Al₂O₃/Al₂O₃ sur une couche métallique W, et une double alternance métal/cermet W/W-Al₂O₃ terminée par une couche antireflet Al₂O₃. Les rendements héliothermiques sont respectivement de 89,00% et de 91,13% pour ces empilements optimisés, à $C = 80$ et $T = 823$ K.

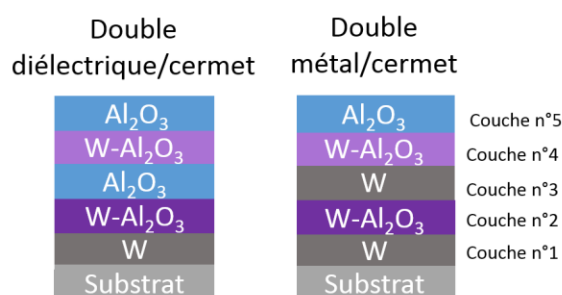


Figure 147 : A gauche, double cermet/diélectrique sur base W, à droite, double métal/cermet avec couche antireflet Al₂O₃

Pour rappel, le critère d'arrêt de l'algorithme d'optimisation est automatique sur le rendement héliothermique (voir chapitre II). Il est fixé à 10^{-5} , ce qui signifie que le rendement héliothermique est optimisé à 0,001% près. Lorsque l'incertitude sur le rendement héliothermique est inférieure à 10^{-5} , le programme considère le problème résolu, stoppe le

processus de sélection et donne l'ensemble admissible des variables, ce qui permet de déterminer l'incertitude et donc la sensibilité de chacune d'elles. Les incertitudes sont calculées à l'aide d'un écart-type sur l'ensemble admissible de chaque variable.

Empilement à double alternance cermet/diélectrique W-Al₂O₃/Al₂O₃

La Figure 148 illustre les résultats obtenus pour un empilement spectralement sélectif composé de deux alternances cermet/diélectrique W-Al₂O₃/Al₂O₃ déposées sur une couche métallique de tungstène (Figure 147, gauche), optimisé pour $C = 80$ et $T = 823$ K.

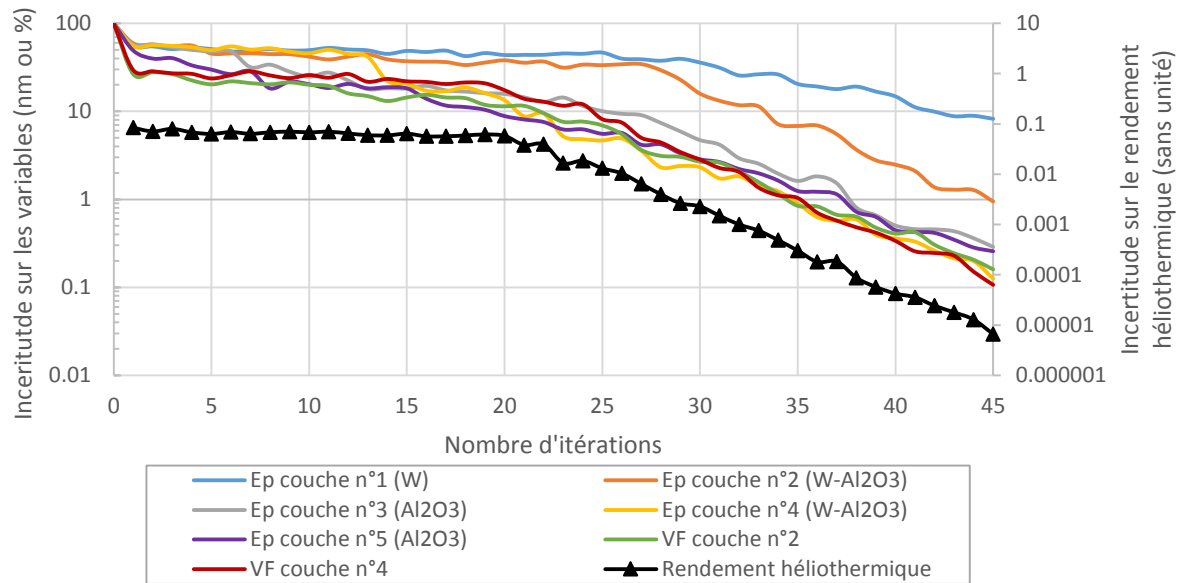


Figure 148 : Convergence des variables d'un empilement spectralement sélectif d'une double alternance cermet/diélectrique W-Al₂O₃/Al₂O₃

En raison du nombre élevé de variables (sept), l'optimisation est particulièrement longue, avec 45 itérations nécessaires. Cette complexité est en grande partie due aux cermets. Il est possible de classer les variables de l'empilement (épaisseurs et fractions volumiques des couches minces) en deux groupes, du moins influent au plus influent, en fonction de la rapidité de convergence (nombre d'itérations nécessaires pour réduire l'incertitude). Les épaisseurs de la couche métallique de tungstène déposée sur le substrat (couche n°1, en bleu) et de la première couche de cermet (couche n°2, en marron clair) ont peu d'influence sur le rendement : l'épaisseur de la couche W peut varier de l'ordre de 10 nm et celle du cermet de l'ordre du nm sans impact sur le rendement héliothermique à 10^{-5} près. Pour la couche métallique, il est juste nécessaire que son épaisseur soit supérieure à une valeur seuil (150 nm dans le cas du tungstène) pour masquer le substrat au rayonnement par opacité. Les épaisseurs ou fractions volumiques des couches minces n°3 à n°5 ont plus d'impact sur le rendement et doivent être plus finement contrôlées, à 2 à 3 nm ou % près pour une précision de 0,5% sur le rendement héliothermique, ce qui reste tout à fait réalisable expérimentalement.

Empilement à double alternance métal/cermet W/W-Al₂O₃

La Figure 149 illustre le cas d'un empilement sélectif composé d'une double alternance métal/cermet W/W-Al₂O₃ (Figure 147, droite) optimisé pour $C = 80$ et $T = 823$ K.

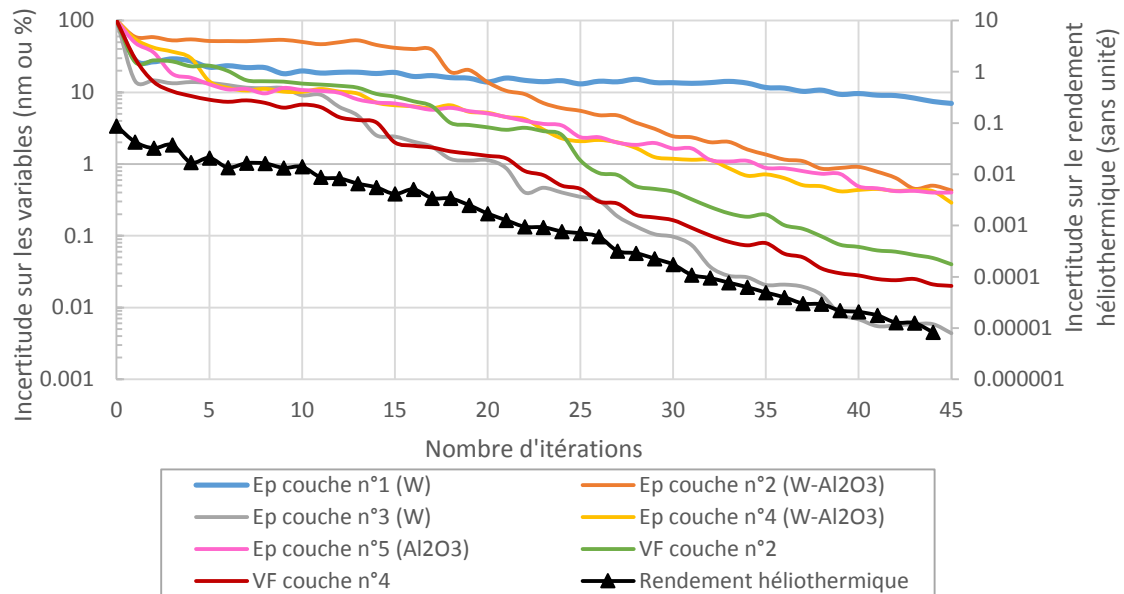


Figure 149 : Convergence de l'optimisation des variables d'un empilement spectralement sélectif à double alternance métal/cermet W/W-Al₂O₃

Cette fois encore, le nombre élevé de variables (sept) entraîne une optimisation longue avec 44 itérations. Il est à nouveau possible de classer les variables de l'empilement (épaisseurs et fractions volumiques des couches minces) en plusieurs groupes, du moins influent au plus influent. La première couche métallique déposée au-dessus du substrat (couche n°1, en bleu) a cette fois encore peu d'importance. Les incertitudes sur les épaisseurs des deux cermets (couches n°2 et n°4, marron et jaune) et de la couche antireflet (couche n°5, en rose) ont légèrement plus d'impact et doivent être contrôlées à quelques nm près pour une précision de 0,1% sur le rendement héliothermique. Ce dernier est le plus sensible aux deux fractions volumiques (VF) des cermets, qui doivent être contrôlées au % pour une précision de 0,1% sur le rendement. Le cermet en surface de l'empilement (couche n°4), a davantage d'impact que le cermet proche du substrat (couche n°2) : les courbes d'incertitude sur l'épaisseur (jaune) et la fraction volumique (rouge) de la couche n°4 sont respectivement toujours en dessous de celles de la couche n°2 (marron et vert), ce qui témoigne d'une plus grande sensibilité (convergence plus rapide). Pour finir la couche de métal intermédiaire (couche n°3, en gris) est la couche la plus sensible. Son épaisseur doit être strictement contrôlée, à 0,5 nm près, pour maximiser le rendement héliothermique à 0,1% près. Trop épaisse, elle bloque le rayonnement solaire et prive l'empilement du bénéfice des couches situées en dessous. Trop fine, elle ne remplit pas son rôle et rapproche l'empilement d'un double cermet, moins performant.

Etude, modélisation et optimisation de surfaces fonctionnelles pour les collecteurs solaires thermiques à concentration

Energie solaire concentrée, couches minces, spectres solaires, optimisation

Les collecteurs des centrales solaires thermodynamiques sont l'un des postes d'investissement principaux et présentent des performances pouvant encore être améliorées. Face à ce constat, ces travaux de thèse explorent les multiples voies d'amélioration de l'efficacité du champ solaire et si possible de réduction du coût des trois types de surfaces le constituant : réflecteurs, vitres antireflet, absorbeurs sélectifs. Pour cela, nous avons développé un programme de simulation et d'optimisation (algorithme stochastique) permettant d'étudier et de maximiser les performances solaires des couches minces optiques assurant les trois fonctions des collecteurs solaires. Nous avons ainsi identifié des solutions à la fois de très haute performance, économes en matériaux rares et intégrant les questions de durabilité. Afin de tirer le plein potentiel des solutions identifiées, nous avons en particulier conduit des modélisations multicritères poussées, en étudiant l'impact de la géométrie du collecteur, des conditions atmosphériques spécifiques du lieu d'installation et des problématiques liées au choix des matériaux et à la fabrication des surfaces (rugosité, incertitudes d'épaisseur et de composition).

Study, modeling and optimization of functional surfaces for concentrated solar thermal collectors

Concentrated solar power, thin films, solar spectra, optimization

Solar thermal power plants use large and expensive solar fields to collect solar energy, the performance of which can still be improved. Faced with this situation, this thesis explores multiple pathways to improve performance and if possible reduce cost of the three types of surfaces encountered in solar collectors: reflectors, antireflective windows, selective absorbers. For this purpose, we have developed a simulation and optimization (stochastic algorithm) program, to study and maximize solar performance of the thin films ensuring the three functions of solar collectors. We have identified several solutions which combine high performance, scarce use of rare materials and durability. To reach the full potential of all identified solutions, we have conducted advance multi-criteria analysis, by studying the impact of collector geometry, local atmospheric conditions and problematics related to material selection and surface fabrication (roughness, thickness and composition errors).