



THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE

présentée par

Mustapha MOULANA

pour obtenir le grade de Docteur en

SCIENCE DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS, ESPACE : TERRE ENVELOPPES FLUIDES

Titre de la thèse :

**Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale
solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage
centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert
radiatif Monte-Carlo**

Thèse soutenue à l'université de Lille le 22 mars 2021 devant le jury :

Mouna El Hafi	Professeure, IMT Mines Albi	Rapportrice
Frédéric Szczap	HDR, LAMP, Université Clermont Auvergne	Rapporteur
Laurent Dubus	Ingénieur-Docteur, RTE France	Examinateur
Nicolas Ferlay	Maître de conférences, LOA, Université de Lille	Examinateur
Richard Fournier	Professeur, LAPLACE, Université Toulouse 3	Examinateur
Jérôme Riedi	Professeur, LOA, Université de Lille	Président
Céline Cornet	Professeure, LOA, Université de Lille	Directrice de thèse
Thierry Elias	Ingénieur-Docteur, HYGEOS	Encadrant
Didier Ramon	Ingénieur-Docteur, HYGEOS	Encadrant (invité)

École doctorale : Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement

Laboratoire d'Optique Atmosphérique

Faculté des sciences et technologies

Université de Lille - UFR de Physique

59655 Villeneuve d'Ascq, FRANCE

Remerciements

Ce travail de thèse a été effectué au Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) de l'Université de Lille, en partenariat avec l'entreprise HYGEOS (thèse CIFRE). Je tiens d'abord à remercier tous les membres du LOA et d'HYGEOS pour leur accueil chaleureux et leur grande gentillesse.

Je remercie sincèrement les rapporteurs de cette thèse, Madame Mouna El Hafi et Monsieur Frédéric Szczap. Je remercie également le reste de mon jury de thèse, à savoir : Messieurs Laurent Dubus, Nicolas Ferlay, Richard Fournier et Jérôme Riedi.

Ce travail a été dirigé par Madame Céline Cornet, et encadré par Messieurs Thierry Elias et Didier Ramon. Je tiens à leur exprimer ma gratitude et mes sincères remerciements pour leurs conseils, leur aide et leur soutien tout au long de cette thèse.

Je remercie bien évidemment (sans citer de noms pour éviter les oublis) tous les membres du laboratoire (enseignants et doctorant!), ainsi que les membres d'HYGEOS pour toutes les discussions, les repas, les aides, ...!

Et enfin, je remercie les membres de famille, et tout particulièrement ma petite famille qui a dû me supporter et me soutenir durant toutes ces années (surtout la dernière année avec la Covid-19).

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Résumé

Le flux collecté par le récepteur d'une centrale solaire thermique à tour est traditionnellement estimé en ne considérant que le rayonnement solaire direct réfléchi par le champ d'héliostats. Nous proposons dans cette thèse le développement d'un code de transfert radiatif atmosphérique amélioré pour non seulement considérer la contribution du rayonnement solaire direct réfléchi par les héliostats, mais aussi toutes les autres contributions comme : le rayonnement solaire diffus, réfléchi par le sol, etc. Pour cela, le code de transfert radiatif atmosphérique Monte-Carlo SMART-G est choisi et est développé pour y incorporer une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste. La méthode pour la création de ce nouvel outil est décrite et validée. Enfin, l'utilisation de ce nouvel outil se révèle être essentielle pour une correcte estimation du flux collecté par une centrale solaire à tour localisée dans un milieu désertique. Dans l'exemple traité, la centrale solaire PS10 déplacée virtuellement à Ouarzazate, les gains environnementaux peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 5%, correspondant à plusieurs mégawatts d'énergies non considérées par les modèles traditionnels.

Mots clés : transfert radiatif, atmosphère, centrale solaire à tour, Monte-Carlo, ray tracing.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Abstract

The flux collected by the receiver of a solar tower plant is traditionally estimated by the only consideration of the direct solar radiation reflected by the heliostat field. In this thesis, we propose the development of a new version of an atmospheric radiative transfer code to consider not only the flux from direct solar radiation reflected by heliostats but also all the other contributions as : the scattered solar radiation, the solar radiation reflected by the ground, on so on. To perform that, the Monte-Carlo atmospheric radiative transfer code SMART-G is chosen and developed to allow the incorporation of a solar tower plant in a realistic atmosphere. The method to create this new tool is completely described and validated. Finally, the use of this new tool has proved to be essential for a correct estimate of the flux collected by a solar tower plant located in a desert place. In the studied example, the PS10 solar power plant virtually moved at Ouarzazate, the environment gains may reach values in the order of 5%, corresponding to several megawatts of energy not considered by traditional models.

Keywords : radiative transfer, atmosphere, solar tower power, Monte-Carlo, ray tracing.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Table des matières

Introduction générale	1
1 Problématique de l'estimation du flux collecté par les centrales solaires à tour	7
1.1 Les centrales solaires thermiques à concentration	9
1.2 Les centrales solaires à tour (CST)	11
1.2.1 Fonctionnement	11
1.2.2 Les centrales en service et en cours de construction	12
1.2.3 Nécessité d'une estimation précise du flux collecté	15
1.3 État de l'art sur l'estimation du flux collecté	16
1.3.1 Les codes de transfert radiatif atmosphérique	17
1.3.2 Les codes de ray tracing	18
1.3.3 L'irradiance normale directe (DNI)	19
1.4 Vers un couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif atmosphérique Monte-Carlo	21
2 Transfert radiatif dans l'atmosphère : définitions et principe des méthodes de Monte-Carlo	23
2.1 Le transfert radiatif dans l'atmosphère	25
2.1.1 Le spectre électromagnétique	25
2.1.2 Notion d'angle solide	26
2.1.3 Les quantités radiométriques de base	29
2.1.4 L'absorption, la diffusion et l'extinction	32

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

2.1.5	La diffusion dans l'atmosphère	35
2.1.6	L'équation de transfert radiatif	38
2.2	Les méthodes de Monte-Carlo	40
2.2.1	Introduction	40
2.2.2	Rappel de quelques définitions	41
2.2.3	Fonctions de densité de probabilité et distribution cumulative	42
2.2.4	L'espérance, la variance et l'écart-type	43
2.2.5	Loi forte des grands nombres et théorème centrale limite .	46
2.2.6	Méthode d'inversion de la fonction de distribution cumulative	47
2.2.7	Deux exemples utilisant la méthode d'inversion	48
3	Méthode pour estimer le flux collecté avec un code de transfert radiatif atmosphérique : application au code SMART-G	53
3.1	Transfert radiatif par méthodes de Monte-Carlo : le code SMART-G	55
3.2	Incorporation of 3D objects in a realistic atmosphere	57
3.2.1	Cas d'une atmosphère purement absorbante	58
3.2.2	Cas d'une atmosphère absorbante et diffusante	61
3.2.3	Validation	63
3.3	Le lancement des photons pour considérer les multiples contributions atmosphériques	71
3.3.1	Le mode de lancement A : suivi en "forward"	73
3.3.2	Le mode de lancement B : suivi en "backward"	78
3.4	Conclusion	81
4	Calcul de l'efficacité optique d'une centrale solaire à tour avec le code SMART-G	83
4.1	L'efficacité optique et ses six composantes	85
4.1.1	Définition	85
4.1.2	Méthodes d'estimation existantes	89
4.1.3	Importance de l'ordre et du poids	90
4.2	Méthode d'estimation avec SMART-G	93

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

4.2.1	L'efficacité optique avec les modes A et B	93
4.2.2	Décomposition de l'efficacité optique avec le mode A	95
4.3	Résultats avec SMART-G sans atmosphère	100
4.3.1	Application à la centrale PS10	100
4.3.2	Comparaison avec des résultats annuels publiés	103
4.3.3	Validation avec le code de ray tracing Solstice	105
4.4	Conclusion	113
5	Impacts atmosphériques sur le flux collecté	115
5.1	Introduction	117
5.2	Gains environnementaux	118
5.3	Modélisation de la centrale et de l'atmosphère	119
5.4	Résultats obtenus avec SMART-G pour une année de simulations	122
5.4.1	Contribution des gains sur le flux collecté	122
5.4.2	Influence des aérosols sur les gains et le flux collecté	127
5.4.3	Analyses de l'efficacité atmosphérique	131
5.5	Conclusion	134
	Conclusion générale et perspectives	137
A	First Results to Evaluate Losses and Gains in Solar Radiation Collected by Solar Tower Plants	143
A.1	INTRODUCTION	145
A.2	METHOD	146
A.2.1	The SMART-G Simulation Tool	146
A.2.2	Solar Beams Incident at the Receiver Classified in Several Categories (Theoretical Background)	147
A.2.3	Optical Losses & Gains	148
A.2.4	Simulations Description	149
A.3	RESULTS AND DISCUSSION	152
A.4	CONCLUSION	155

Références	172
------------	-----

Table des figures

1.1	Consommation électrique en France d'une journée de l'hiver 2015.	10
1.2	Les quatre types de systèmes solaires thermiques à concentration.	11
1.3	Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à tour.	12
1.4	Image de la centrale solaire à tour SUPCON Delingha à 50 MW, et de sa petite soeur de 10 MW composée de deux tours (Chine).	13
2.1	Représentation de certaines régions du spectre électromagnétique en fonction du nombre d'onde $\tilde{\nu}$, de la fréquence ν et de la longueur d'onde λ . Avec en haut de l'image des valeurs de longueur d'onde.	26
2.2	Définition de l'angle solide élémentaire $d\Omega$, où r représente la dis- tance entre le sommet du cône et le centre de la surface élémentaire dS , et α l'angle entre les deux vecteurs unitaires $\vec{e}_r$ et $\vec{e}_s$	27
2.3	L'angle solide élémentaire $d\Omega$ en coordonnées sphériques, défini par un cône de sommet O (centre de la sphère) et de surface élémentaire la portion de sphère dS , avec r (rayon de la sphère) la distance entre le sommet et la surface élémentaire du cône.	28
2.4	Représentation schématique de la luminance qui provient d'un angle solide élémentaire $d\Omega$ traversant la surface élémentaire projetée $d\Sigma$ de la surface élémentaire dS	31
2.5	Représentation de la fonction de phase de diffusion à 500 nm pour trois tailles différentes d'aérosols sphériques : 10^{-4} μm (a), 0,1 μm (b) et 1 μm (c)	37

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

2.6	Les trois principaux régimes de diffusion en fonction de la taille de la particule et de la longueur d'onde.	37
3.1	Chemin parcouru par un photon, dans la direction $\vec{u}$, démarrant du point p_a jusqu'à son intersection avec un objet 3D situé à l'intérieur d'une couche atmosphérique c_i . Avec τ_i l'épaisseur optique depuis l'altitude z_i jusqu'à TOA, et τ_{atm} l'épaisseur optique du sol jusqu'à TOA. En vert, les grandeurs à calculer	60
3.2	Chemin parcouru par un photon, dans la direction $\vec{u}$, démarrant du point p_a jusqu'à sa collision avec un composant atmosphérique situé à l'intérieur de la couche c_i . Définitions similaires pour les paramètres communs avec la figure 3.1. En vert, les grandeurs à calculer.	63
3.3	Description des paramètres initiaux de simulation. Les photons sont lancés depuis la source vers le sol en direction de l'origine du repère.	64
3.4	Réflectances sortantes à 550 nm à TOA pour le cas de référence (sans objet 3D). Représentation en coordonnées polaires des réflectances en fonction de l'angle zénithal et de l'angle azimutal (en haut), et représentation graphique en fonction de l'angle zénithal dans le plan d'incidence solaire (en bas).	65
3.5	Description des paramètres de simulation pour le cas test 1. Les photons sont lancés depuis une source à TOA et se dirigent vers le sol en direction du point d'origine. Un objet rectangulaire de 30 km x 20 km sert d'obstacle à une partie des photons diffusés. . . .	66
3.6	Description identique à la figure 3.4; avec à droite le cas de référence, et à gauche le cas avec un obstacle de 30 km x 20 km introduit dans l'atmosphère.	67
3.7	Identique à la figure 3.5 mais pour le cas test 2, avec un obstacle carré de 20 km x 20 km	68

3.8	Description identique à la figure 3.6 ; avec à droite le cas de référence, et à gauche le cas avec un obstacle de 20 km x 20 km introduit dans l'atmosphère.	68
3.9	Identique à la figure 3.5 mais pour le cas test 2, avec un obstacle rectangulaire de 120 km x 20 km	69
3.10	Description identique à la figure 3.6 ; avec à droite le cas de référence, et à gauche le cas avec un obstacle de 120 km x 20 km introduit dans l'atmosphère.	70
3.11	Représentation d'une partie des chemins optiques que peut possiblement emprunter un photon avant son arrivée sur le récepteur d'une CST.	72
3.12	Représentation schématique des photons, ayant pour surface élémentaire dS , distribués sur la surface de lancement S_{toa} (en bleu) de normale $\vec{n}_{toa}$, dans la direction du rayonnement solaire $\vec{u}_s$	76
3.13	Identique à la figure 3.12 mais avec en plus une direction échantillonnée des photons $\vec{\omega}_s$ à l'intérieur de l'angle solide solaire Ω_s , et où δ_s représente le rayon angulaire solaire.	78
3.14	Représentation schématique du lancement des photons avec le mode de lancement B. Une fois arrivés à TOA, les photons se retrouvent dans une direction comprise à l'intérieur de l'angle solide solaire inverse Ω_{s-} (en vert) ou à l'extérieur (en rouge).	80
4.1	Représentation schématique des six types de pertes optiques dans une centrale solaire à tour.	86
4.2	Représentation de deux héliostats H_1 et H_2 de surface A_h et de normale N_h , recevant le rayonnement solaire direct (en bleu). L'héliostat H_1 est horizontal (au repos), et l'héliostat H_2 incliné d'un angle θ . A_c est la surface projetée de l'héliostat H_2 perpendiculaire au rayonnement incident.	87

4.3	Représentation de deux héliostats H_1 et H_2 avec en bleu un rayon issu du rayonnement solaire direct atteignant la surface de l'héliostat H_2 , et en rouge la trajectoire de ce même rayon qui devait atteindre H_1 si il n'était pas dans l'ombre de H_2	88
4.4	Propagation du rayonnement solaire en direction un champ de 3 héliostats (H_1 , H_2 et H_3) et réfléchi vers le récepteur R (petite CST), dans une atmosphère supposée vide. $\eta_{cos_H_i}$, $\eta_{omb_H_i}$, $\eta_{ref_H_i}$ et $\eta_{blo_H_i}$ sont respectivement les efficacités cosinus, d'ombrage, de réflectivité et de blocage d'un héliostat H_i ; η_{atm} et η_{deb} les efficacités atmosphérique et de débordement de la CST. En bleu le flux incident avant et après avoir subit des pertes, et en rouge le flux perdu.	91
4.5	Configuration du champs d'héliostats de la centrale PS10. Chaque point bleu représente un héliostat. La tour est aux coordonnées (0,0).101	
4.6	Distribution du flux collecté à la surface du récepteur (DNI à 1000 W/m ²) suivant les résultats obtenus avec Solstice et SMART-G mode A et B, le 21 mars à midi pour deux valeurs du rayon angulaire solaire δ_s (en degrés).	108
4.7	Identique à la figure 4.6 mais pour le 21 mars au matin.	108
4.8	Distribution du flux collecté à la surface du récepteur suivant les résultats obtenus avec Solstice et SMART-G mode A et B (avec un source solaire ponctuelle), le 21 mars à midi pour trois valeurs de rugosité S_r (en milliradians).	111
4.9	Identique à la figure 4.8 pour le 21 mars au matin.	112
5.1	Représentation schématique de quelques chemins optiques possibles que le rayonnement solaire peut emprunter avant d'atteindre le récepteur R d'une CST composée de 4 héliostats H . Les lignes rouges discontinues représentent les gains environnementaux. La ligne bleue montre le rayonnement solaire direct réfléchi par le champ d'héliostats et collecté par le récepteur.	119

5.2	Exposant d'Ångström entre 440 et 870 nm (en ordonnée) en fonction du temps (abscisse) des mesures AERONET, des trois modèles OPAC standard : <i>continental_clean</i> , <i>desert</i> et <i>desert_coarse</i> , et du nouveau modèle réalisé à partir des trois modèles OPAC.	120
5.3	Épaisseur optique des aérosols (AOT en ordonnée) en fonction du temps (abscisse) des mesures AERONET et du nouveau modèle réalisé à partir des modèles standards OPAC : <i>continental_clean</i> , <i>desert</i> et <i>desert_coarse</i> . En haut les valeurs à 440 nm, et en bas à 870 nm.	121
5.4	Évolutions des moyennes mensuelles calculées du flux direct collecté (barre hachurée en bleu) et du flux des gains environnementaux (barre en rouge) collectés en fonction des mois de l'année 2014 à gauche, et à droite du pourcentage des gains environnementaux relativement au flux direct collecté.	124
5.5	Évolutions des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique des aérosols à 550 nm (à gauche), de l'exposant d'Ångström entre 440 et 870 nm (au centre) et de la vapeur d'eau (à droite) en fonction des mois de l'année 2014.	124
5.6	Pourcentage des gains environnementaux (barre de couleur) relativement au flux direct collecté des 8556 simulations de l'année 2014 en fonction de l'épaisseur optique des aérosols à 550 nm (axe vertical) et de l'exposant d'Ångström de 440 et 870 nm (axe horizontal). A gauche avec une échelle normale et à droite avec une échelle logarithmique.	126
5.7	Identique à la figure 5.6 pour les flux en mégawatts des gains environnementaux.	126
5.8	Les points de mesure de la station AERONET de Ouarzazate en 2014 de niveau 2 en fonction de SZA (axe vertical) et de SAA (axe horizontal), pour les mois de janvier (a) et août (b).	130

5.9	Flux total collecté (direct + gains) en fonction du SZA (axe vertical) et SAA (axe horizontal) de l'année 2014 complète. A gauche, le cas avec une modélisation atmosphérique sans aérosols et constante tout au long de l'année, et à droite, le cas avec une modélisation atmosphérique variable en fonction du temps selon les mesures de la station AERONET 2014.	130
5.10	Évolutions des moyennes mensuelles 2014 de l'efficacité atmosphérique (ligne continue noire) et la transmittance oblique (ligne de tirets bleu).	134
A.1	Schematic of three beams reaching the receiver R from three different paths. One path where the beam (blue dashed line) gets one interaction from the process of heliostats reflection (reflected by the heliostat H), the second beam (green two dot-dashed line) gets also one interaction but from the process of environment reflection (here the ground), and the last beam (grey dot-dashed line) get two interactions, both from the process of atmospheric scattering. . . .	147
A.2	Schematic description of the position of the receiver R and the heliostats H1, H2, H3 and H4.	150
A.3	Sum of receiver incident intensities (Arbitrary Unit) of solar beams from Cat.3, 4, 5, 6, 7 and 8 (vertical axis) in function of the size of the square zone at TOA (horizontal axis).	151
A.3	Receiver incident intensities (Arbitrary Unit) of solar beams from Cat.2, 3, 4, 5 and 7 for AOT of 0.25, 0.5, 0.75 and 1 in the first column. Intensities of solar beams from all the same categories except Cat.2 in the second column.	154
A.4	Percentage of gain from Cat.5 intensity relatively to Cat.2 intensity (reference for gains and losses) at the receiver, in function of AOT and the horizontal average heliostat-receiver distance (D_{hr}).	155

Liste des tableaux

1.1	Centrales solaires à tour commerciales en service ou en cours de construction.	14
4.1	Informations sur les héliostats et le récepteur de la centrale PS10.	102
4.2	Estimations annuelles (non pondérées par le DNI) de l'efficacité cosinus, d'ombrage, de blocage et de débordement obtenues avec SMART-G et trois autres codes utilisés par Wei, Noone et Eddhibi. η_{ob} fait référence au produit des efficacités d'ombrage et de blocage.	104
4.3	L'efficacité optique totale η_{opt} et quatre de ses composantes calculées (avec une erreur standard inférieure à 0.01%) avec Solstice et avec SMART-G, en mode A et B, pour le 21 mars à midi pour deux valeurs du rayon angulaire solaire δ_s (en degrés). Les différences en pourcentage entre SMART-G (A/B) et Solstice sont données suivant le calcul : [(résultat SMART-G (A/B) - résultat Solstice)/résultat Solstice] x 100.	107
4.4	Identique à la table 4.3 mais pour le 21 mars au matin	107
4.5	L'efficacité optique et quatre de ses composantes calculées avec SMART-G et Solstice, le 21 mars à midi pour 3 valeurs de rugosité S_r (en milliradians). Les différences en pourcentage entre SMART-G A et Solstice sont données suivant le même calcul que donné dans la table 4.3.	110
4.6	Identique à la table 4.5 mais pour le 21 mars au matin	110

5.1	Moyenne annuelle et moyennes mensuelles (2014) de l'épaisseur optique des aérosols (AOT) à 550 nm, de l'exposant d'Ångström (440 à 870 nm), de la vapeur d'eau (H ₂ O) en g/cm ² , du flux total collecté par le récepteur (direct + gains), du flux direct réfléchi par les héliostats collecté par le récepteur (direct) et du flux des gains environnementaux collecté (gains). Les gains en pourcentage sont calculés suivant l'équation : $\text{Gains [\%]} = (\text{Gains [MW]} / \text{Direct [MW]}) \times 100$. Résultats selon la modélisation de l'atmosphère présentée à la section 5.3.	123
5.2	Identique à la table 5.1 sans l'AOT, l'exposant d'Ångström et la vapeur d'eau mais avec en plus la moyenne annuelle et les moyennes mensuelles de l'année 2014 du SZA et SAA le matin.	129
5.3	Moyenne annuelle et moyennes mensuelles 2014 de l'efficacité atmosphérique $\overline{\eta_{atm}}$, et différences en pourcentage par rapport l'efficacité atmosphérique de la transmittance d'extinction de la distance oblique moyenne héliostats - récepteur $\overline{T_{DHR}^{ext}}$, calculés selon l'équation : $[(\overline{T_{DHR}^{ext}} - \overline{\eta_{atm}}) / \overline{\eta_{atm}}] \times 100$	133
A.1	Solar beams from all the possible optical paths, classified with three radiative processes in eight categories. Only possible paths from one to three interactions are given, but the classification is valid for any number of interactions. The category colors are helpful for the Fig. A.1, 4 and 5.	148
A.2	Receiver and heliostat characteristics	150

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, la demande énergétique mondiale ne cesse d'augmenter et dépasse désormais les quatorze millions de kilotonnes équivalent pétrole. En 2018, c'est environ quatre-vingts pour cent de cet approvisionnement énergétique mondial qui s'effectue par le biais d'énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) [1]. Ces énergies fossiles présentent deux problèmes majeurs, elles sont épuisables et elles produisent une partie importante des rejets anthropiques de gaz à effet de serre, soit soixante-cinq pour cent en 2010 [2]. Ces rejets ne sont malheureusement pas sans conséquences. D'après le rapport du Groupe Intergouvernemental d'Études sur le Climat (GIEC) [3], le réchauffement climatique et ses rétroactions engendré par les rejets anthropiques de gaz à effet de serre conduit entre autres à l'augmentation des désastres naturels (cyclone, sécheresse, inondation, ...), à la disparition d'espèces animales et végétales et à l'élévation du niveau de la mer. Pour pouvoir continuer à répondre à la demande mondiale énergétique toujours croissante, et pour ralentir la croissance de la température globale terrestre, l'une des solutions est de remplacer progressivement ces énergies fossiles par des énergies renouvelables moins émettrices de gaz à effet de serre.

En ce qui concerne la production d'électricité, les énergies hydroélectrique, éolienne et solaire figurent parmi les technologies renouvelables les plus propres et les plus connues. L'énergie hydroélectrique est par rapport aux énergies solaire et éolienne généralement moins coûteuse et plus flexible, mais cependant plus limitée géographiquement. Le Brésil, par exemple, a la chance de posséder plusieurs sites (rivières, fleuves, ...) permettant la mise en place de centrales hydroélectriques [4], ce qui n'est pas le cas des pays plutôt désertiques. De plus, à l'heure actuelle,

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

les centrales hydroélectriques ont déjà été développées dans la plupart des sites le permettant, ce qui limite également leur expansion. Avec ces limites concernant l'énergie hydroélectrique, plusieurs modèles de prévision statuent que les énergies éolienne et solaire sont les énergies renouvelables ayant le plus fort potentiel [5, 6, 7, 8]. Sur une échelle mondiale, l'association DESERTEC a été plus loin en annonçant que quatre-vingt-dix pour cent des besoins de la population mondiale pouvait être satisfaits par de l'énergie propre en provenance de déserts [9], c'est-à-dire par l'énergie solaire.

L'énergie solaire représente l'une des meilleures alternatives aux énergies fossiles. Pour la production électrique à grande échelle, il y a les centrales solaires photovoltaïques et les Centrales Solaires Thermiques à Concentration (CSTC). Les centrales photovoltaïques sont les moins chères à mettre en place, alors que les CSTC coûtent plus cher mais sont plus flexibles avec une production électrique pouvant durer plusieurs heures en absence de soleil. La Centrale Solaire à Tour (CST) est l'une des technologies solaires thermiques à concentration qui donne la possibilité de produire de l'électricité de manière très flexible le jour (durant le passage de nuages, de poussières désertiques, ...) mais aussi durant la nuit (lorsqu'elles sont équipées d'un système de stockage thermique). Pour ces raisons, les constructions de CST se multiplient avec des centrales toujours plus grandes et plus coûteuses, créant ainsi le besoin d'une estimation (préalablement à la construction de la centrale) toujours plus précise de la production électrique. Ces estimations précises sont nécessaires pour éviter que de mauvais scénarios se produisent, comme avec la fermeture de la CST à environ un milliard de dollars, *Crescent Dunes*, le rendement attendu n'ayant jamais été atteint [10, 11].

Une CST, de manière simplifiée, est un champ d'héliostats (miroirs asservis sur la position solaire) qui concentre le rayonnement solaire vers un récepteur qui se situe en haut d'une tour. L'une des phases les plus importantes pour estimer la production électrique d'une CST, est l'estimation du flux (en watts) collecté par le récepteur.

Pour estimer le flux collecté par le récepteur d'une CST, des codes de "ray tracing" (lancer de rayons en français) ont commencé à apparaître à partir des

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

années mille neuf cent soixante-dix avec Helios [12] jusqu'à très récemment avec, par exemple, Solstice [13]. Ces codes permettent de simuler le rayonnement solaire incident réfléchi par le champ d'héliostats vers le récepteur, en estimant toutes les pertes optiques géométriques possibles qui peuvent être dues à des effets de blocages, ombrages, etc. Mais ces codes de ray tracing sont insuffisants pour l'estimation du flux collecté. En effet ils nécessitent en entrée la densité de flux solaire (en watts par mètre carré) au niveau du sol, normale à la direction solaire, à savoir l'irradiance normale directe (DNI pour Direct Normal Irradiance en anglais). Le DNI est estimé par d'autres outils de deux manières : soit numériquement par un code simulant la propagation de la lumière depuis l'espace jusqu'au sol, à savoir un code de Transfert Radiatif Atmosphérique (TRA) comme SMARTS [14] ou MODTRAN [15] ; soit de manière instrumentale à partir de mesures réalisées depuis le sol (par exemple : un pyhéliomètres, un radiomètre, ...). L'utilisation d'instruments sols offre généralement des résultats plus précis que les codes numériques (i.e. les codes de TRA), mais est limité géographiquement, et assez coûteux en terme de temps et d'équipements. Le DNI est estimé plusieurs fois pour un intervalle de temps donné pour considérer la variation temporelle de l'atmosphère.

Actuellement, l'amélioration et le déploiement de plus en plus important de capteurs satellites et sols permettent d'acquérir des données de meilleures qualités à des résolutions temporelles, spectrales et spatiales toujours plus fines. Ceci permet d'améliorer la représentation de la variabilité atmosphérique et ainsi également l'estimation du flux collecté.

Pour affiner encore davantage l'estimation du flux collecté, nous avons imaginé la création d'une version améliorée d'un code de TRA Monte-Carlo, où une CST est placée à l'intérieur d'une atmosphère réaliste (i.e. une atmosphère où les composants atmosphériques sont considérés grâce à des mesures par satellites et/ou in situ), pour simuler la propagation de la lumière depuis l'espace jusqu'au récepteur ce qui permet d'aller au delà d'une simulation jusqu'au sol habituellement utilisée. Cette nouvelle version, permet de simuler non seulement les interactions entre rayonnement solaire et objets 3D (par exemple les héliostats et le récepteur), mais

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

également les chemins des rayons solaires diffusés par les composants atmosphériques (les nuages, gaz, poussières, ...). Ainsi les pertes déjà prises en compte par les codes de ray-tracing sont calculées précisément mais plusieurs contributions liées à l'environnement de la centrale (atmosphère, surface) sur le flux collecté, jusqu'à maintenant négligées, sont comptabilisées. La modélisation du flux collecté par la centrale dans une atmosphère réaliste permet donc de répondre à la demande croissante de précision sur le flux collecté, mais permet aussi d'estimer d'autres quantités comme la distribution spatiale du flux sur le récepteur et l'estimation de la perte par extinction (absorption et diffusion par les composants atmosphérique) entre les heliostats et le récepteur.

L'estimation directe du flux collecté avec un code de TRA Monte-Carlo, nécessite non seulement, comme avec les codes de ray tracing, que le rayonnement solaire puisse interagir avec des objets 3D, mais nécessite aussi que soit prise en compte la nouvelle dépendance de ces interactions rayonnement objets 3D avec les composants atmosphériques (par exemple le rayonnement solaire subit une diffusion au lieu d'atteindre l'héliostat); ces ajouts au code accentue la demande déjà assez gourmande en puissance de calcul, c'est pour cette raison que nous avons choisi l'un des codes de TRA Monte-Carlo les plus rapides, à savoir SMART-G (Speed-Up Monte-Carlo Advanced Radiative Transfer code with GPU) [16] pour effectuer ce couplage atmosphère - centrale solaire.

Cette thèse est structurée en cinq chapitres. Le premier chapitre présente en détail la technologie des centrales solaires à tour, ainsi que les outils existants pour estimer le flux collecté par une CST. Le deuxième chapitre rappelle certaines bases fondamentales du transfert radiatif et des méthodes de Monte-Carlo, pour pouvoir comprendre plus facilement les chapitres suivants. A partir du troisième chapitre est présentée la méthode développée dans cette thèse qui permet au code SMART-G de considérer des objets 3D dans une atmosphère réaliste. Le quatrième chapitre présente la méthode pour estimer toutes les pertes optiques d'une CST dans une atmosphère réaliste. Il s'en suit une étude de vérification et de comparaison sans atmosphère (il n'existe actuellement pas de codes similaires avec une atmosphère réaliste) en utilisant un code de ray tracing et des résultats publiés. Les travaux

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

énoncés dans les chapitres trois et quatre permettent de présenter et de vérifier la praticabilité des nouvelles fonctionnalités développées dans le code SMART-G. Le cinquième chapitre explore ces nouvelles possibilités en présentant des estimations du flux collecté, ainsi que d'autres quantités, pour une centrale existante avec une atmosphère réaliste lors d'une année complète. Les résultats obtenus montrent finalement la nécessité de considérer le couplage complet atmosphère-CST pour améliorer l'estimation de la production électrique d'une CST.

L'annexe A représente un article présenté à la conférence SolarPACES (Solar Power and Chemical Energy Systems) de 2018. Les travaux présentés montrent les premiers résultats obtenus sur le flux collecté avec une centrale solaire à tour simplifiée incorporée dans une atmosphère réaliste. L'article introduit également une nouvelle classification sur la provenance des rayons solaires incidents sur la surface du récepteur de la centrale.

Chapitre 1

Problématique de l'estimation du flux collecté par les centrales solaires à tour

Ce premier chapitre commence par une présentation rapide des centrales solaires thermiques à concentration pour pouvoir par la suite introduire plus facilement les Centrales Solaires à Tour (CST). Après cette partie de familiarisation avec les CST, plusieurs méthodes existantes pour estimer le flux collecté sont exposées. Actuellement, pour estimer le flux radiatif solaire collecté par les CST, des codes de Transfert Radiatif Atmosphérique (TRA) et des codes de ray tracing (tracé de rayons) sont utilisés indépendamment. Le chapitre présente une brève revue sur les codes de TRA, ainsi qu'une synthèse des codes de ray tracing actuellement utilisés pour l'étude des CST. Enfin, le chapitre se termine par l'introduction de la méthode élaborée lors de cette thèse pour améliorer la précision du flux collecté par les CST.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Sommaire

1.1	Les centrales solaires thermiques à concentration . . .	9
1.2	Les centrales solaires à tour (CST)	11
1.2.1	Fonctionnement	11
1.2.2	Les centrales en service et en cours de construction . . .	12
1.2.3	Nécessité d'une estimation précise du flux collecté	15
1.3	État de l'art sur l'estimation du flux collecté	16
1.3.1	Les codes de transfert radiatif atmosphérique	17
1.3.2	Les codes de ray tracing	18
1.3.3	L'irradiance normale directe (DNI)	19
1.4	Vers un couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif atmosphérique Monte- Carlo	21

1.1 Les centrales solaires thermiques à concentration

Les Centrales Solaires Thermiques à Concentration (CSTC) sont avec les centrales PhotoVoltaïques (PV), les deux principales technologies solaires qui permettent une production électrique à grande échelle. Les CSTC coûtent généralement plus chères que les centrales PV, néanmoins elles présentent l'avantage d'un système efficace de stockage thermique. Cet avantage a plusieurs implications : là où la production chute avec les centrale PV pendant un passage nuageux, la production reste stable avec les CSTC ; et là où les centrale PV ne permettent plus de produire de l'électricité en fin de journée (heures où la demande ménagère est habituellement forte), les CSTC permettent encore de produire de l'électricité, et ce durant plusieurs heures. Pour illustration, la figure 1.1 représente la consommation électrique en France durant une journée en Hiver (représentatif de l'allure générale de la consommation électrique un peu partout dans le monde). La forte demande électrique arrivant en soirée, est clairement visible. Pour toutes ces raisons, les CSTC, bien que plus coûteuses que les centrales PV, sont de plus en plus préférées dans les projets solaires, comme par exemple avec le complexe solaire Noor, qui est composé de trois CSTC (Noor I, II et III) et d'une centrale PV (Noor IV).

Il existe quatre types de CSTC, les Centrales Solaires à Tour (CST), les collecteurs Fresnel linéaires, les collecteurs paraboliques et les collecteurs cylindro-paraboliques (voir figure 1.2). Les CST offrent généralement plus de souplesse, avec en général un plus grand rendement énergétique et un plus grand potentiel de stockage thermique (lorsqu'elles sont équipées d'un système de stockage) [17], jusqu'à 15 heures de stockage pour la centrale Gemasolar (voir table 1.1). Les CST ont la particularité d'avoir une inertie thermique qui permet, pendant les courts passages nuageux, sans l'aide d'un système de stockage thermique, de continuer à produire de l'électricité de manière stable ; ce qui fait qu'en comparaison avec les centrales PV, il reste toujours un avantage pour les CST même

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

non munies d'un système de stockage. La technologie cylindro-parabolique est la plus mature des quatre technologies solaires à concentration, avec une importante exploitation commerciale. Cependant, une étude comparant les collecteurs cylindro-paraboliques avec les CST [18] montre qu'il y a bien plus d'avantages avec les CST (par exemple : un rendement plus efficace, une puissance par surface terrestre utilisée plus élevée, ...), élevant ainsi les CST parmi les technologies solaires à concentration au plus fort potentiel. Les CST, objets de cette thèse, sont présentées dans la suite.

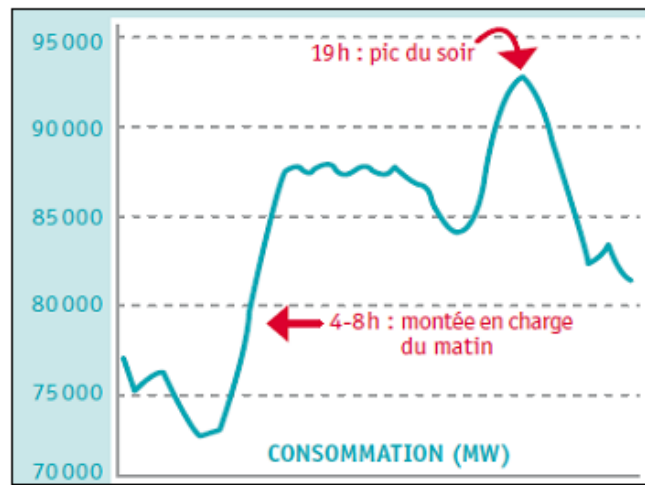


FIGURE 1.1 – Consommation électrique en France d'une journée de l'hiver 2015 [19].

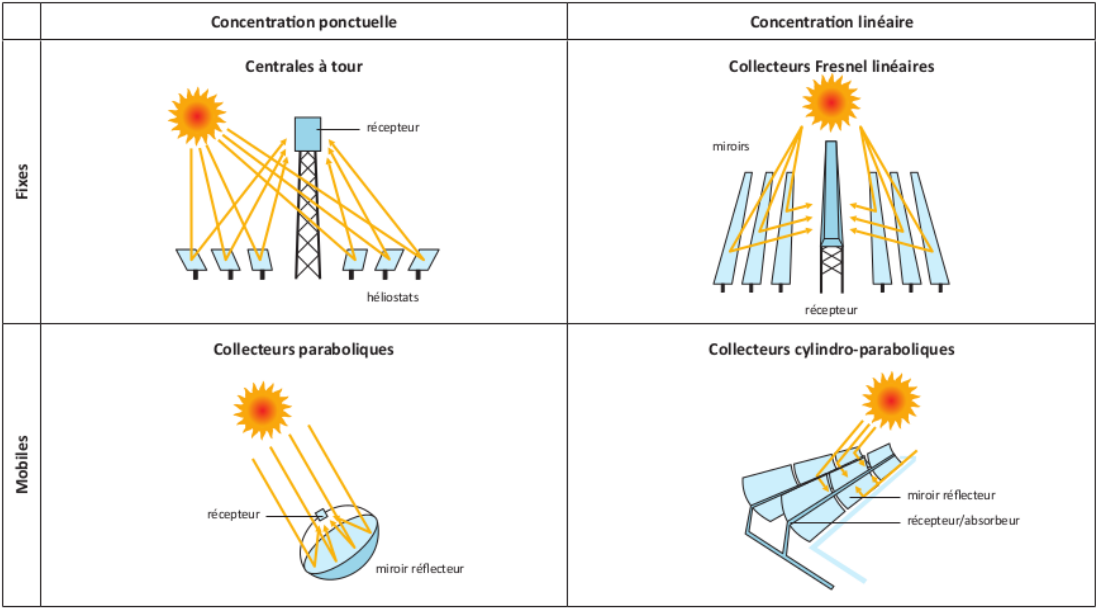


FIGURE 1.2 – Les quatre types de systèmes solaires thermiques à concentration [20].

1.2 Les centrales solaires à tour (CST)

1.2.1 Fonctionnement

Une CST est une centrale solaire composée d'un champ d'héliostats (miroirs rotatifs qui suivent la position du soleil) qui concentre le rayonnement solaire incident vers un récepteur (métallique ou céramique pour les hautes températures, pour plus détails sur les types de récepteurs voir [21]) situé au sommet d'une tour (voir Figure 1.3). Le rayonnement solaire concentré par les multiples héliostats permet au récepteur d'atteindre une température très élevée, pouvant dépasser les mille degrés. Une bonne partie de cette chaleur est ensuite transmise à un fluide caloporteur, généralement un mélange de sels fondus comme les sels de nitrate. Le fluide est ensuite transporté et stocké dans un réservoir à haute isolation thermique (hot storage tank), qui permet de maintenir durant plusieurs heures le fluide à haute température. Par la suite cette chaleur est utilisée par un générateur à vapeur pour produire de l'électricité. Le fluide, n'ayant plus la température

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

suffisante, se dirige vers un second réservoir (cold storage tank) pour rejoindre son cycle de départ. Ce système de stockage thermique permet à certaines centrales une production électrique jour et nuit. Par exemple, le système de stockage thermique de la centrale Gemasolar permet une production électrique 24h/24 pendant l'été.

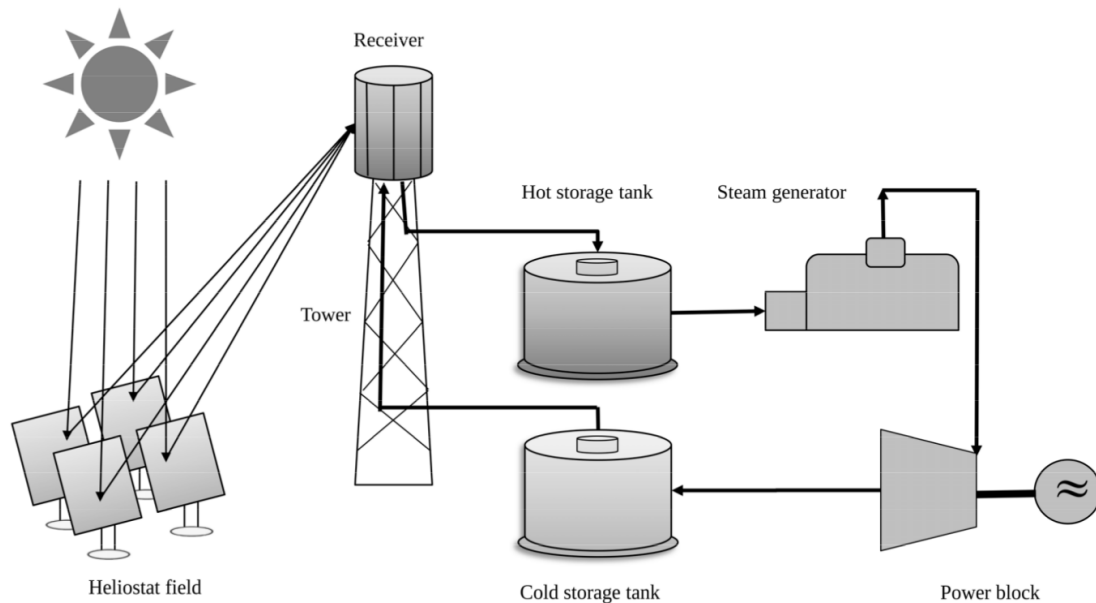


FIGURE 1.3 – Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à tour [22].

1.2.2 Les centrales en service et en cours de construction

Les premières centrales à tour à but commercial ont été mises en service dans les années mille neuf cent quatre-vingt, par exemple la centrale Solar One aux Etats-Unis ou la centrale Themis pour la France. Malheureusement, ces centrales ont été fermées avec l'émergence de l'énergie nucléaire et du contre-choc pétrolier de 1986. Cependant, la prise de conscience, toujours plus forte d'année en année, de l'urgence d'une migration des énergies fossiles vers des énergies renouvelables moins polluantes, permettent aux CST commerciales de réapparaître de nouveau intéressantes. En 2007 la centrale PS10 est mise en fonctionnement. Depuis, ces centrales ne cessent de se multiplier un peu partout dans le monde. La table 1.1 permet de visualiser la liste actuelle de toutes les CST commerciales en service et

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

en construction, en fonction des pays.

Actuellement, soixante-quinze pour cent des CST commerciales sont munies d'un système de stockage thermique comme le seront les deux CST à venir (Atacama-1 et DEWA CSP Tower Project). Cela indique que l'inertie thermique des CST sans stockage, qui permet d'être plus flexible que les centrales PV durant la journée, n'est généralement pas suffisante et que la production électrique en soirée et/ou durant la nuit, avec un système de stockage assez coûteux, prime davantage.

La Chine est actuellement le pays qui détient presque 60 pour cent des CST en service dotées d'un système de stockage. La figure 1.4 montre deux d'entre-elles, à savoir les centrales solaires à tour de 50 et 10 MW du désert de Gobi. Parmi les grandes CST atteignant au moins les 100 MW, celle avec la plus grande capacité de stockage thermique est également localisée en Chine (jusqu'à 11 heures). Toutefois d'autres grandes centrales à venir devraient dépasser ce record avec la centrale DEWA et Atacama-1 qui auront respectivement 15 et 17.5 heures de capacité de stockage.

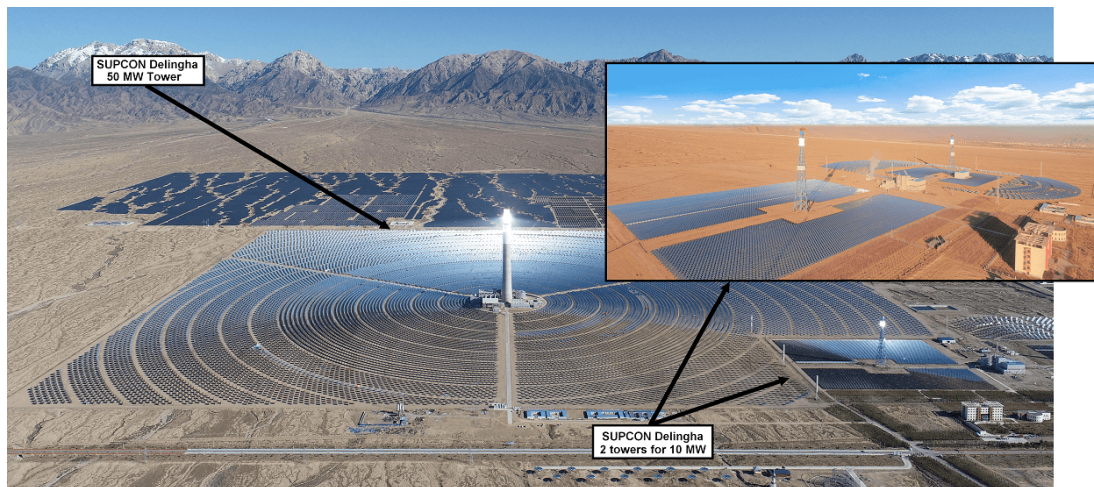


FIGURE 1.4 – Image de la centrale solaire à tour SUPCON Delingha à 50 MW, et de sa petite soeur de 10 MW composée de deux tours (Chine) [23, 24].

En 2009, la centrale espagnole PS20 avec ses 20 MW était la plus puissante des CST commerciales en service. En 2014, la centrale américaine Ivanpah a largement battu ce record, avec une capacité de puissance net de 377 MW (avec 3 tours).

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Depuis et jusqu'à aujourd'hui, la grande majorité des nouvelles CST mises en service sont composées d'une capacité de 50MW, ou de CST de 100 à 134 MW.

TABLE 1.1 – Centrales solaires à tour commerciales en service ou en cours de construction. Table compilée principalement à partir des informations de [25].

Pays	Nom	Année de mise en service	Puissance net [MW]	Stockage [h]	État
Afrique du sud	Khi Solar One	2016	50	2h	En service
Australie	Sundrop CSP Project	2016	1.5	Non	En service
Chili	Atacama-1	–	110	17.5h	En construction
Chine	SUPCON Delingha 10 MW Towers [23]	2013	10	2h	En service
	Shouhang Dunhuang 10 MW Phase I	2016	10	15h	En service
	SUPCON Delingha 50 MW Tower [24]	2018	50	7h	En service
	Shouhang Dunhuang 100 MW Phase II	2018	100	11h	En service
	Qinghai Gonghe 50 MW CSP Plant [26]	2019	50	6h	En service
	Hami 50 MW CSP project	2019	50	8h	En service
	Luneng Haixi 50MW Molten Salt Tower	2019	50	12h	En service
Émirats Arabes Unis	DEWA CSP Tower Project	2021	100	15h	En construction
Espagne	Planta solar 10	2007	11	1h	En service
	Planta solar 20	2009	20	1h	En service
	Gemasolar	2011	19.9	15h	En service
États-Unis	Sierra SunTower	2009	5	Non	En service
	Ivanpah Solar Electric Generating System	2014	377	Non	En service
Israël	Ashalim Plot B	2019	121	Non	En service
Maroc	NOOR III	2018	134	7h	En service

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

1.2.3 Nécessité d'une estimation précise du flux collecté

La "bancabilité" d'une CSTC (un projet bancable est un projet avec un degré de risques suffisamment faible pour permettre son financement par les banques) dépend de plusieurs facteurs comme les risques liés au pays (les instabilités politiques, développement économique, ...), les risques techniques (par exemple le manque d'infrastructures pour le raccordement au réseau de distribution électrique), mais également les risques en ressource (par exemple la disponibilité de données précises sur la quantité et la variabilité d'ensoleillement) [27]. L'un des apports permettant d'améliorer significativement la bancabilité d'une CSTC est l'amélioration de l'estimation de la production électrique, notamment grâce à une meilleure représentation de la forte variabilité atmosphérique (temporelle et spatiale). Plusieurs études le confirment en affirmant la nécessité d'estimations plus précises des données d'ensoleillement [28, 29, 30, 31]. Dans le cas d'une CST, améliorer la bancabilité nécessite donc d'améliorer l'estimation du flux collecté par le récepteur de la centrale. Dans la prochaine section, nous verrons en partie les outils existants pour estimer le flux collecté.

1.3 État de l'art sur l'estimation du flux collecté

Dans cette section, une présentation est donnée sur les méthodes utilisées jusqu'à aujourd'hui (couplage de plusieurs outils indépendants) pour l'estimation du flux collecté par les CST, ainsi que sur une partie des différents outils utilisés. La nouvelle méthode mise en place dans cette thèse sera introduite dans la section 1.4.

Le flux collecté est actuellement estimé en deux étapes. Pour rappel, les héliostats d'une CST sont orientés de sorte à renvoyer le rayonnement solaire direct vers le récepteur. La première phase consiste alors à estimer le rayonnement solaire direct incident sur la surface des héliostats, à savoir l'estimation de l'irradiance normale direct au sol (DNI pour Direct Normal Irradiance). Le DNI permet de considérer la variabilité atmosphérique, qui varie énormément en fonction du lieu géographique et du temps. L'estimation du DNI s'effectue généralement par calcul avec un code de Transfert Radiatif Atmosphérique (TRA) en simulant la propagation de la lumière depuis l'espace jusqu'au sol, mais également par la mesure d'instruments de télédétection au sol. Les codes de TRA sont présentés dans la section 1.3.1. Le flux incident réfléchi par le champ d'héliostats subit plusieurs pertes optiques décrites au chapitre 4 (ombrages, blocages, etc), notamment dues à la conception géométrique de la centrale. La deuxième phase consiste à utiliser un code de ray tracing (tracé de rayons) indépendant du code TRA, pour simuler le trajet suivi par le rayonnement solaire des héliostats vers le récepteur (voir la section 1.3.2 pour une description plus détaillée des codes de ray tracing), ce qui permet d'estimer l'efficacité optique (reliée aux pertes optiques) de la centrale. Ainsi, le flux collecté par le récepteur de la CST, à un instant donné, est obtenu en multipliant l'efficacité optique (estimée indépendamment du DNI) par la surface totale des héliostats et la valeur du DNI à cet instant.

Dans la suite, les outils existants et généralement utilisés pour l'estimation du flux collecté par une CST sont présentés avec une brève revue des codes TRA et des codes de ray tracing. Le DNI est ensuite introduit avec plus de détails, avec notamment une précision sur la différence qui existe entre le DNI calculé par un

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

code de TRA et le DNI mesuré par les instruments sols.

Une description plus détaillée du transfert radiatif dans l'atmosphère est présentée dans le chapitre suivant.

1.3.1 Les codes de transfert radiatif atmosphérique

Dans le cadre de l'étude d'une CST, les codes de TRA sont utilisés pour l'estimation du DNI comme les codes SMARTS, Libratran ou MODTRAN [14, 32, 15]. En connaissant l'irradiance solaire direct au sommet de l'atmosphère (TOA pour Top Of Atmosphere en anglais) (valant 1360 W/m^2 plus ou moins quelques pourcents selon la distance terre-soleil), il suffit d'entrer dans le code de TRA le profil atmosphérique étudié (paramétré i.e. choix des types et/ou quantités de molécules, aérosols et nuages en fonction des mesures satellites et sols). Le code, à travers la résolution numérique des équations de transfert radiatif, permet la considération de l'absorption et de la diffusion (par les molécules, les aérosols et les nuages) du rayonnement solaire dans l'atmosphère.

En plus du calcul du DNI pour l'estimation du flux collecté par une CST, dans certaines études, les codes de TRA sont utilisés pour estimer avec précision l'atténuation atmosphérique du rayonnement solaire direct entre les héliostats et le récepteur [33, 34]. D'autres approches basées sur la théorie du transfert radiatif sont également proposées [35, 36].

Les revues sur les codes de TRA manquent cruellement dans la littérature. Cependant, de petites revues existent, en introduction dans certains articles [37, 38]. Une présentation de Phillipe Dubuisson lors un atelier Trattoria 2015 présente de manière assez générale les codes de TRA [39]; avec les différentes variantes que nous pouvons retrouver selon le type de code, comme la géométrie (1D/3D), la résolution spectrale (monochromatique, raie par raie, modèle de bande), la méthode de résolution de l'équation de transfert radiatif (Monte-Carlo, ordonnées discrètes, adding-doubling, ordres successifs de diffusion), les processus radiatifs considérés (polarisation, émission, absorption gaz, absorption/diffusion aérosols et nuages), la gamme spectrale (infrarouge, visible, ultraviolet), la prise en compte

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

des surfaces (lambertienne, marine, désertiques) et les quantités radiatives calculées (luminance, densité de flux, transmission).

Les codes de TRA les plus précis sont les codes 3D résolvant l'équation de transfert radiatif par la méthode statistique de Monte-Carlo [39]. Parmi les codes 3D de TRA utilisant Monte-Carlo, il y a le code MYSTIC, MSCART, SASKTRAN [40, 41, 42], mais aussi 3DMCPOL et SPARTA [43, 44] qui ont fait l'objet de plusieurs études de comparaison très récemment [45, 46]. Mais ces codes 3D, qui sont les plus précis, sont également les plus lents.

Dans le cadre des travaux de cette thèse, nous utilisons le code de TRA SMART-G [47]. Le code SMART-G a été développé par Hygeos (depuis 2009) et est toujours maintenu. Le code n'englobe pas encore du transfert radiatif 3D, mais résout les équations de transfert radiatif polarisée via la méthode de Monte-Carlo dans une atmosphère 1D plan parallèle ou sphérique. SMART-G permet de faire des simulations monochromatiques ou intégrées spectralement (par exemple avec REPTRAN [48] ou la méthode de la k-distribution [49]). Il est possible de prendre en compte une surface 3D pour la réflexion sur le sol. L'un des grands avantages de SMART-G est l'utilisation de la technologie du calcul parallèle par carte graphique (GPU), offrant ainsi une réduction importante des temps de calcul permettant une résolution d'étude plus large. Le code SMART-G est présenté avec plus de détails dans le chapitre 3 (voir section 3.1).

1.3.2 Les codes de ray tracing

Les codes de ray tracing, utilisé dans un deuxième temps, simule le rayonnement solaire direct (à partir du sol et non depuis TOA) incident et réfléchi par le champ d'héliostats jusqu'au récepteur de la centrale. Ces codes sont utilisés pour calculer l'efficacité optique de la CST, essentiellement avec le calcul des efficacités d'ombrage, cosinus, blocage et de débordement (voir chapitre 4).

C'est à partir des années soixante-dix que les codes de ray tracing de première génération ont vu le jour, avec les codes HELIOS, MIRVAL et DELSOL [12, 50, 51], dans le but d'étudier la centrale à tour Solar One du désert des

Mojaves [52]. D'autres codes ont, par la suite, émergé comme SOLFAST, SolTRACE, STRAL, Tonatiuh et Solstice [53, 54, 55, 56, 13]. Contrairement aux codes de TRA, les synthèses bibliographiques sur les codes de ray tracing pour l'estimation de l'efficacité optique des CST sont abondantes [52, 57, 22, 58].

Certains codes de ray tracing englobent un modèle pour le calcul de l'atténuation atmosphérique comme DELSOL3 [59]. Une revue assez exhaustive est disponible dans [60]. Elle détaille les différents modèles utilisés par les codes de ray tracing depuis les années mille neuf cent soixante-dix pour le calcul de l'atténuation atmosphérique, mais aussi sur l'utilisation d'autres modèles plus récents et plus précis qui se basent sur la théorie du transfert radiatif.

1.3.3 L'irradiance normale directe (DNI)

Le DNI représente la densité de flux (en watts par mètre carré), au niveau de la surface terrestre, incidente sur une surface perpendiculaire à la direction solaire (direction du rayonnement solaire incident à TOA). L'estimation du DNI est pour la méthode actuelle (couplage d'outils indépendants) nécessaire pour l'estimation du flux collecté. L'obtention du DNI est possible depuis un code de TRA (code présenté dans la section 1.3.1) mais aussi par la mesure d'un instrument au sol comme le pyréliomètre, le RSI (Rotating Shadowband Irradiometer), ou le SSIM (Solar Spectral Irradiance Meters), etc [61, 62]. Néanmoins, selon l'outil utilisé les estimations du DNI ne sont pas équivalentes, d'où une multitude de définitions, dont deux d'entre-elles sont présentées dans ce chapitre (définitions reprises en s'appuyant sur la publication de Blanc et al. [61]).

Les concepts de disque solaire et de région circumsolaire sont essentiels pour comprendre et introduire les définitions du DNI.

Le soleil observé depuis la terre a la forme d'un disque avec une intensité du rayonnement solaire plus intense au centre du disque qu'aux extrémités. Cette variabilité de l'intensité est due au phénomène d'assombrissement du limbe ("limb darkening"), dépendant de la longueur d'onde, et est causé par de l'absorption et la diffusion du rayonnement dans l'atmosphère du soleil [63, 61]. La prise en

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

compte de ce disque solaire est importante dans l'étude des CST pour une représentation réaliste de la distribution du flux incident à la surface du récepteur (voir chapitre 4).

La région circumsolaire, quant à elle, représente la région lumineuse qui peut être observée autour du disque solaire. La diffusion avant dans l'atmosphère terrestre par les nuages, les molécules atmosphériques et les particules d'aérosols entraîne une partie du flux en provenance du disque solaire vers la région circumsolaire [64].

Les codes de TRA simulent la propagation de la lumière avec régulièrement l'hypothèse d'une source solaire ponctuelle [61]. Le DNI est ainsi généralement calculé sans considérer le disque solaire. Ce DNI, calculé à partir du produit de l'irradiance directe normale en TOA par la transmittance d'extinction (voir section 2.1.4 du chapitre 2 pour la définition de la transmittance) depuis l'espace jusqu'au sol, est nommé le DNI stricte.

Le DNI mesuré par les instruments de télédétection est différent du DNI stricte. En prenant l'exemple du pyréliomètre présenté par Blanc et al. [61], le DNI est mesuré à partir du rayonnement solaire incident entrant avec un certain demi-angle d'ouverture, généralement de 2.5° . Pour rappel, le demi-angle solaire vaut environ 0.266° , ce qui signifie qu'en plus de considérer le rayonnement solaire direct du disque solaire, le pyréliomètre mesure également une partie du rayonnement solaire diffus qui provient de la région circumsolaire. Le DNI ainsi mesuré est nommé le DNI expérimental. Les codes de TRA peuvent également inclure des modifications permettant de calculer le DNI expérimental, comme par exemple avec la version modifiée du code de TRA MYSTIC [65].

Dans cette thèse, le disque solaire est considéré (mais sans considérer la variabilité spectrale et spatiale de l'intensité à l'intérieur du disque) ainsi que la région circumsolaire qui est pris en compte implicitement lors du calcul du flux collecté à travers une simulation réaliste incluant le couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de TRA Monte-Carlo. Ce code est introduit dans la section 1.4 qui suit.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

1.4 Vers un couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif atmosphé- rique Monte-Carlo

Nous avons présenté et vu que la CST est la technologie solaire thermique avec le plus fort potentiel (voir la section 1.2). L'intérêt pour cette technologie ne cesse donc d'augmenter et est rendu visible au travers de la multiplication des projets depuis 2007 (voir la table 1.1). La construction de centrales plus grandes et plus coûteuse nécessite une diminution plus importante des risques pour faciliter leur financement, c'est-à-dire pour rendre les projets bancables.

Pour rendre les CST bancables, nous avons vu dans la section 1.2 que l'un des facteurs les plus importants est l'estimation précise du flux collecté. Nous avons également vu les méthodes utilisées jusqu'à aujourd'hui pour l'estimation du flux collecté (voir section 1.3) qui juxtapose l'utilisation d'un outil pour estimer le DNI (code de TRA ou instruments sols) pour considérer l'atténuation atmosphérique sur le rayonnement solaire depuis l'espace jusqu'au sol et l'utilisation d'un code de ray tracing pour l'estimation de l'efficacité optique de la centrale du sol jusqu'au récepteur (qui tient compte des pertes d'ombrage, blocage, etc.). Afin d'améliorer l'estimation du flux collecté, plusieurs études proposent une meilleure considération de la variabilité atmosphérique (temporelle et spatiale) au travers d'estimations plus précises du DNI (voir la section 1.2), tout en considérant l'atténuation atmosphérique du champ d'héliostats jusqu'au récepteur (via des modèles basés sur le transfert radiatif voir la section 1.3).

Afin d'affiner encore plus l'estimation du flux collecté, nous proposons dans cette thèse une approche différente, avec un abandon de la manière classique (estimation du DNI puis de l'efficacité optique via des outils indépendants). La nouvelle méthode que nous proposons couple le transfert radiatif atmosphérique et la CST ce qui permet en plus de la contribution du rayonnement solaire direct sur le flux collecté, de comptabiliser également la contribution du rayonnement solaire lié par les processus de diffusion et/ou de réflexion (rayonnement diffus,

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

réfléchi par le sol, etc., qui arrive sur la surface du récepteur).

Les codes TRA Monte-Carlo (les plus précis) sont les plus lents. Le développement d'une nouvelle version qui permet le couplage CST - atmosphère ne fera qu'accentuer ce problème de temps de calcul. Il est donc primordial de choisir l'un des codes de TRA Monte-Carlo les plus rapides, d'où le choix dans cette thèse du code SMART-G (description plus détaillée du code à la section 3.1 du chapitre 3).

Dans le chapitre 2 qui suit, des notions fondamentales sur le transfert radiatif dans l'atmosphère et sur les méthodes de Monte-Carlo sont présentées. Ces notions sont essentielles pour comprendre la méthode qui permettra au code SMART-G d'estimer directement le flux collecté par une CST, présentée dans le chapitre 3.

Chapitre 2

Transfert radiatif dans l'atmosphère : définitions et principe des méthodes de Monte-Carlo

L'objectif dans ce chapitre est de présenter les définitions de base, sur la théorie du transfert radiatif appliquée à l'atmosphère terrestre et sur les méthodes de Monte-Carlo. Ces définitions serviront dans les chapitres suivants. Le chapitre a également pour but de décrire les notations utilisées concernant les différentes quantités physiques et mathématiques. Ce chapitre est composé de deux parties. La première partie présente les bases du transfert radiatif atmosphérique et s'inspire des livres de Jacqueline Lenoble [66] et Kuo-Nan Liou [67], les livres de Subrahmanyam Chandrasekhar [68] et H.C. Van De Hulst [69] sont des références établis. La deuxième partie présente les méthodes de Monte-Carlo, et s'inspire essentiellement du livre de William L Dunn et J Kenneth Shultis [70]. Les lecteurs qui maîtrisent bien le transfert radiatif et les méthodes de Monte-Carlo peuvent directement passer au chapitre suivant.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Sommaire

2.1	Le transfert radiatif dans l'atmosphère	25
2.1.1	Le spectre électromagnétique	25
2.1.2	Notion d'angle solide	26
2.1.3	Les quantités radiométriques de base	29
2.1.4	L'absorption, la diffusion et l'extinction	32
2.1.5	La diffusion dans l'atmosphère	35
2.1.6	L'équation de transfert radiatif	38
2.2	Les méthodes de Monte-Carlo	40
2.2.1	Introduction	40
2.2.2	Rappel de quelques définitions	41
2.2.3	Fonctions de densité de probabilité et distribution cumulative	42
2.2.4	L'espérance, la variance et l'écart-type	43
2.2.5	Loi forte des grands nombres et théorème centrale limite	46
2.2.6	Méthode d'inversion de la fonction de distribution cumulative	47
2.2.7	Deux exemples utilisant la méthode d'inversion	48

2.1 Le transfert radiatif dans l'atmosphère

2.1.1 Le spectre électromagnétique

Dans l'atmosphère, une partie du transfert d'énergie s'effectue par rayonnement électromagnétique. Les autres transferts d'énergie sont liés à un échange de chaleur sensible par convection et à un échange de chaleur latente par changement de phase. Ces processus physiques ne sont pas l'objet de cette thèse et seront donc ignorés. Le transfert d'énergie radiative s'effectue par propagation d'ondes électromagnétiques, à une vitesse proche de celle de la lumière.

Le *spectre électromagnétique* représente la répartition des ondes électromagnétiques selon la longueur d'onde. Il est décomposé en plusieurs domaines spectraux dont par exemple les domaines infrarouge, visible et ultraviolet (voir figure 2.1). L'être humain a la capacité de voir les ondes électromagnétiques se trouvant dans la région du spectre visible, à savoir, les ondes ayant une longueur d'onde comprise entre 400 et 700 nanomètres. Les ondes électromagnétiques sont caractérisées selon leur nombre de vibrations par unité de temps, en parlant plus généralement de fréquence dont l'unité est le Hertz (ou seconde⁻¹), ou plus anciennement de cycles par seconde (cps ou c/s). L'équation liant nombre d'onde, fréquence et longueur d'onde est la suivante :

$$\tilde{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda} \quad (2.1)$$

avec $\tilde{\nu}$ le nombre d'onde (en mètre⁻¹), ν la fréquence (en seconde⁻¹), λ la longueur d'onde (en mètre) et c la vitesse de la lumière dans le vide qui vaut 299 792 458 m/s.

La description des transferts d'énergie radiative utilise des quantités radiométriques, qui sont présentées dans les prochaines sections.

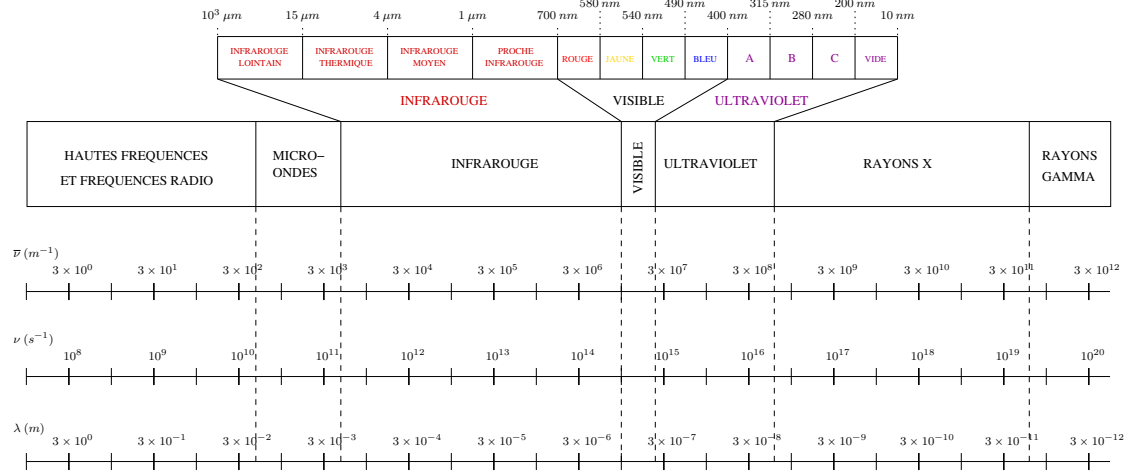


FIGURE 2.1 – Représentation de certaines régions du spectre électromagnétique en fonction du nombre d'onde $\tilde{\nu}$, de la fréquence ν et de la longueur d'onde λ . Avec en haut de l'image des valeurs de longueur d'onde.
Figure compilée suivant différentes sources dont [67].

2.1.2 Notion d'angle solide

Il est primordiale de bien comprendre cette notion d'angle solide avant de passer à la présentation des quantités radiométriques, certaines quantités sont en effet décrites en utilisant l'angle solide, dont la luminance [voir l'équation (2.10)]. L'angle solide apparaît également lors de l'utilisation des méthodes de Monte-Carlo que nous verrons à la section 2.2 de ce chapitre. Son utilisation ne s'arrête pas là, il sera utilisé tout au long de cette thèse, avec par exemple la considération de l'angle solide solaire (voir chapitre 3).

L'angle solide est une grandeur qui s'exprime en stéradian, c'est la version tri-dimensionnelle de l'angle plan.

Angle solide défini par un cône

Soit un cône quelconque délimité par un sommet et un élément de surface dS . La distance entre le sommet et le centre de l'élément de surface vaut r , avec suivant la direction de cette droite, le vecteur unitaire $\vec{e}_r$ (voir figure 2.2). Le

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

vecteur unitaire normale à l'élément de surface dS est noté $\vec{e}_s$. α est l'angle entre les deux vecteurs unitaires $\vec{e}_r$ et $\vec{e}_s$. L'angle solide élémentaire, noté $d\Omega$, est ainsi défini par l'équation ci-dessous :

$$d\Omega = \frac{\cos(\alpha) dS}{r^2} = \frac{d\Sigma}{r^2} \quad (2.2)$$

Où $d\Sigma$ est la projection de la surface dS perpendiculaire à la direction du vecteur $\vec{e}_r$.

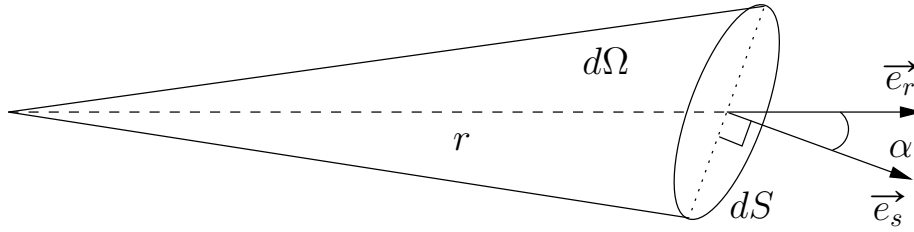


FIGURE 2.2 – Définition de l'angle solide élémentaire $d\Omega$, où r représente la distance entre le sommet du cône et le centre de la surface élémentaire dS , et α l'angle entre les deux vecteurs unitaires $\vec{e}_r$ et $\vec{e}_s$.

Angle solide en coordonnées sphériques

Soit une sphère de rayon r . On isole un cône qui a pour sommet le point au centre de la sphère O et comme élément de surface son intersection avec la sphère noté dS (voir la figure 2.3). Pour rappel, l'angle plan vaut le rapport entre la longueur de l'arc intercepté et le rayon du cercle. De manière similaire à l'angle plan, l'angle solide élémentaire $d\Omega$ vaut le rapport entre la surface interceptée et le rayon de la sphère élevé au carré [équivalent à la définition de l'angle solide élémentaire de l'équation (2.2) pour un angle $\alpha = 0$] :

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} \quad (2.3)$$

En intégrant la surface élémentaire dS sur l'ensemble de la sphère, on obtient l'angle solide intégré Ω égal à 4π indépendant du rayon de la sphère.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

En se basant sur la figure 2.3, on retrouve l'expression suivante de la surface élémentaire dS :

$$dS = r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \quad (2.4)$$

Une autre expression très largement utilisée de l'angle solide élémentaire $d\Omega$ se déduit à partir de la définition de l'angle solide élémentaire de l'équation (2.3) et de l'expression de la surface élémentaire de l'équation (2.4) :

$$d\Omega = \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \quad (2.5)$$

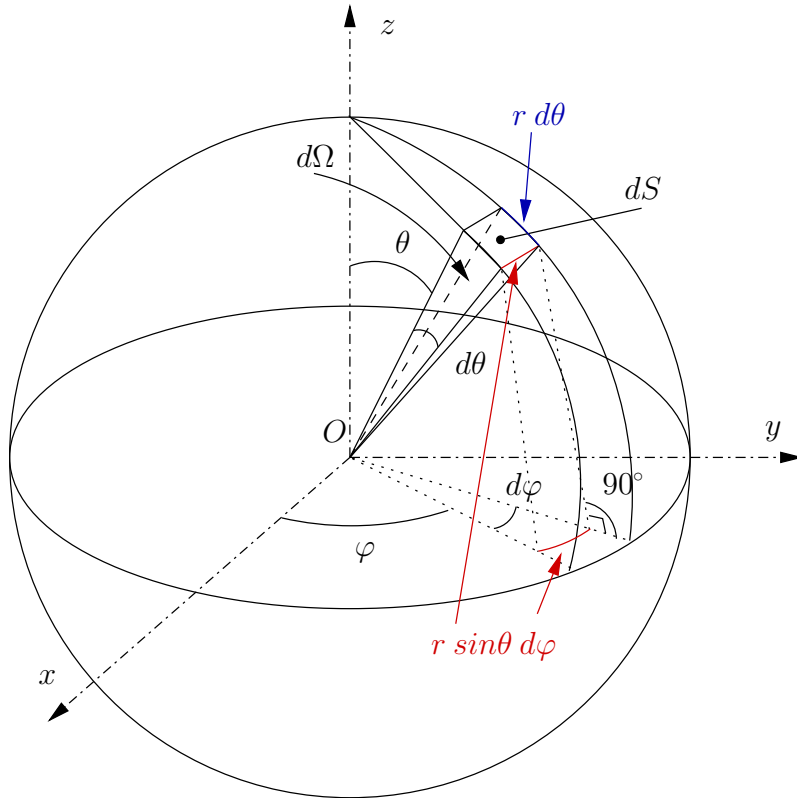


FIGURE 2.3 – L'angle solide élémentaire $d\Omega$ en coordonnées sphériques, défini par un cône de sommet O (centre de la sphère) et de surface élémentaire la portion de sphère dS , avec r (rayon de la sphère) la distance entre le sommet et la surface élémentaire du cône.

2.1.3 Les quantités radiométriques de base

Les quantités radiométriques permettent une description de l'énergie radiative et de sa propagation dans un milieu.

L'énergie radiative Q (en joule) transportée par les ondes électromagnétiques est définie par l'équation ci-dessous :

$$Q = \frac{h c}{\lambda} \quad (2.6)$$

où h est la constante de Planck et vaut environ $6,626 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{Kg} \cdot \text{s}^{-1}$, c la vitesse de la lumière dans le vide et λ la longueur d'onde.

Le *flux radiatif* monochromatique, noté Φ_λ , désigne une portion de l'énergie radiative dQ , qui se déplace par une unité de temps dt , dans un intervalle spectrale donné, de λ à $\lambda + d\lambda$, et dont l'unité est le watt par mètre :

$$\Phi_\lambda = \frac{dQ}{dt d\lambda} \quad (2.7)$$

Pour décrire la distribution du flux radiatif monochromatique à travers une surface, il y a la *densité de flux radiatif* monochromatique, noté F_λ (en watts par mètre carré par mètre) :

$$F_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{dS} \quad (2.8)$$

où $d\Phi_\lambda$ représente une portion du flux radiatif monochromatique, reçu ou émis à la surface élémentaire dS , depuis toutes les directions de l'espace. Pour caractériser la densité de flux radiatif reçue par une surface, le terme *irradiance* noté E est utilisé et pour la densité de flux radiatif émise par une source surfacique, le terme *émittance* noté M .

La densité de flux intégrée spectralement, entre deux longueurs d'ondes λ_a et λ_b , notée $F(\lambda_a, \lambda_b)$, est définie par l'équation suivante :

$$F(\lambda_a, \lambda_b) = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} F_\lambda d\lambda \quad (2.9)$$

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Pour prendre en considération la distribution du flux radiatif monochromatique dans une direction d'angle solide donnée à travers une surface élémentaire, on définit la *luminance* monochromatique, notée L_λ (en watts par mètre carré par stéradian par mètre) :

$$L_\lambda = \frac{d\Phi_\lambda}{d\Omega d\Sigma} = \frac{d\Phi_\lambda}{\cos\theta d\Omega dS} \quad (2.10)$$

où $d\Sigma$ représente la surface perpendiculaire à la direction du segment centrale du cône représentant l'angle solide élémentaire $d\Omega$, qui est également la projection de la surface élémentaire dS , comme illustré sur la figure 2.4.

La luminance est très généralement exprimée en fonction de la densité de flux radiatif, comme ci-dessous :

$$L_\lambda = \frac{dF_\lambda}{\cos\theta d\Omega} \quad (2.11)$$

Soit une luminance monochromatique réfléchiée par une surface, notée $L_{r,\lambda}(\vec{\omega}_r)$, dans la direction $\vec{\omega}_r$ (direction d'observation), pour une densité de flux monochromatique incidente, notée $F_{i,\lambda}(\vec{\omega}_i)$, suivant la direction $\vec{\omega}_i$. La *réflectance bidirectionnelle* monochromatique (sans unité), notée $\rho_\lambda(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r)$, est ainsi définie par l'équation qui suit :

$$\rho_\lambda(\vec{\omega}_i, \vec{\omega}_r) = \frac{\pi L_{r,\lambda}(\vec{\omega}_r)}{F_{i,\lambda}(\vec{\omega}_i)} \quad (2.12)$$

La réflectance bidirectionnelle (abrégée réflectance) nous servira à caractériser les signaux observés au sommet de l'atmosphère (voir section 3.2.3 du chapitre 3).

L'exposant d'Ångström (sans unité), noté $\text{\AA}$, est généralement utilisé en tant d'indicateur de taille des aérosols, défini par l'équation ci-dessous :

$$\text{\AA} = -\frac{\ln(\frac{\tau_{ext,\lambda_1}}{\tau_{ext,\lambda_2}})}{\ln(\frac{\lambda_1}{\lambda_2})} \quad (2.13)$$

où τ_{ext,λ_1} est l'épaisseur optique d'extinction (voir l'équation 2.27b) à la longueur d'onde λ_1 et τ_{ext,λ_2} à la longueur d'onde λ_2 . Nous utiliserons l'exposant

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

d'Ångström pour s'accorder entre la modélisation numérique des aérosols et les mesures in situ (voir section 5.3 du chapitre 5).

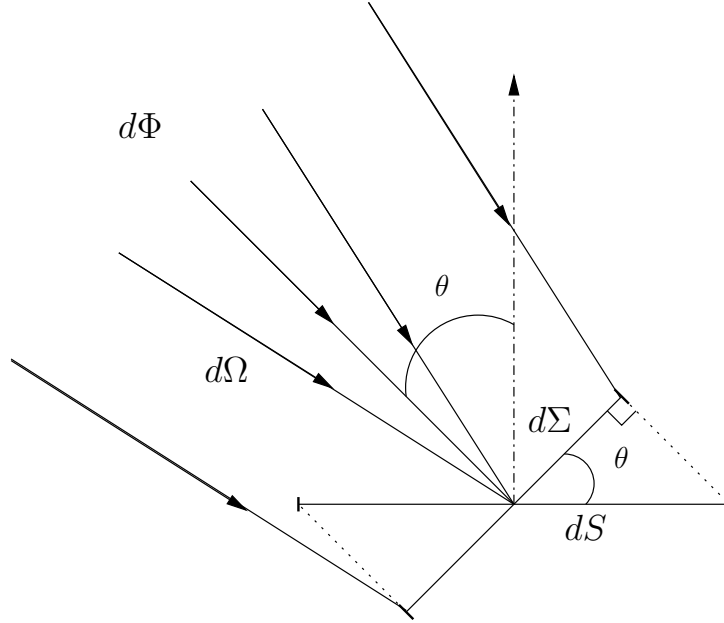


FIGURE 2.4 – Représentation schématique de la luminance qui provient d'un angle solide élémentaire $d\Omega$ traversant la surface élémentaire projetée $d\Sigma$ de la surface élémentaire dS .

2.1.4 L'absorption, la diffusion et l'extinction

Les rayonnements électromagnétiques qui se propagent dans l'atmosphère interagissent avec les particules la composant par des phénomènes d'absorption et de diffusion. Dans cette section, plusieurs quantités permettant la description de ces phénomènes de diffusion et d'absorption sont présentées en trois parties : la première sur l'absorption, la deuxième sur la diffusion, et la troisième sur l'extinction qui est la somme des deux précédents processus.

L'absorption

Une luminance monochromatique L_λ qui entre et passe à travers un élément de longueur dl sera atténuée par absorption. La luminance monochromatique sortante vaut $L_\lambda + dL_\lambda$, avec dL_λ définie par l'équation ci-dessous :

$$dL_\lambda = -\sigma_{abs,\lambda} L_\lambda dl \quad (2.14)$$

où $\sigma_{abs,\lambda}$ est le coefficient d'absorption monochromatique (en mètre⁻¹). La loi de Beer-Lambert-Bouger se retrouve en intégrant l'équation (2.14) entre z_1 et z_2 :

$$L_\lambda(z_2) = L_\lambda(z_1) e^{-\tau_{abs,\lambda}} \quad (2.15)$$

où z_1 et z_2 sont les positions de la luminance respectivement avant et après le phénomène d'absorption, et $\tau_{abs,\lambda}$ l'épaisseur optique d'absorption monochromatique qui est l'intégrale du coefficient d'absorption monochromatique de z_1 à z_2 , définie comme suit :

$$\tau_{abs,\lambda} = \int_{z_1}^{z_2} \sigma_{abs,\lambda}(z) dl \quad (2.16)$$

Le taux d'absorption se quantifie de deux manières différentes, avec la transmittance d'absorption T_a et l'absorbance α , définies, pour une longueur d'onde

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

donnée λ , par les équations ci-dessous :

$$T_{a,\lambda} = \frac{L_\lambda(z_2)}{L_\lambda(z_1)} = e^{-\tau_{abs,\lambda}} \quad (2.17a)$$

$$\alpha_\lambda = \frac{L_\lambda(z_1) - L_\lambda(z_2)}{L_{a,\lambda}(z_1)} = 1 - T_{a,\lambda} \quad (2.17b)$$

La diffusion

La luminance monochromatique L_λ d'un point z_1 à un point z_2 , en contact avec de la matière, subit également de la perte par diffusion, qui se traduit par un changement de trajectoire du rayonnement.

Il peut être déterminé, avec un raisonnement similaire à l'absorption, les équations suivantes :

$$dL_\lambda = -\sigma_{dif,\lambda} L_\lambda dl \quad (2.18)$$

$$\tau_{dif,\lambda} = \int_{z_1}^{z_2} \sigma_{dif,\lambda}(z) dl \quad (2.19)$$

$$T_{d,\lambda} = \frac{L_\lambda(z_2)}{L_\lambda(z_1)} = e^{-\tau_{dif,\lambda}} \quad (2.20)$$

où $\sigma_{dif,\lambda}$, $\tau_{dif,\lambda}$ et $T_{d,\lambda}$ représentent respectivement les coefficient, épaisseur optique et transmittance de diffusion monochromatiques.

La distribution angulaire du rayonnement diffusé est décrite par ce qui est appelé la *fonction de diffusion* notée $f(\theta_d)$ (en $\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$). La relation entre la densité de flux radiatif et la fonction de diffusion est établie, pour une longueur d'onde donnée λ , par l'équation ci-dessous :

$$d\Phi_\lambda = f_\lambda(\theta_d) F_\lambda dv d\Omega \quad (2.21)$$

où l'équation (2.21) décrit une densité de flux monochromatique F_λ qui entre dans un volume dv de section dS et de longueur dl , et où le rayonnement est

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

diffusé avec un angle θ_d à l'intérieur d'un angle solide $d\Omega$.

Le flux radiatif monochromatique, comme pour le raisonnement avec la luminance, vaut en entrée Φ_λ et en sortie $\Phi_\lambda + d\Phi_\lambda$, avec $d\Phi_\lambda$ retrouvée en intégrant l'équation (2.21) :

$$d\Phi_\lambda = -F_\lambda dv \int \int_{space} f(\theta_d) d\Omega \quad (2.22)$$

L'équation qui met en relation la densité de flux monochromatique $d\Phi_\lambda$ et le coefficient de diffusion monochromatique $\sigma_{dif,\lambda}$ se retrouve, sachant que le flux radiatif est proportionnel à la luminance, en utilisant les équations (2.8) et (2.18) :

$$d\Phi_\lambda = -\sigma_{dif,\lambda} F_\lambda dv \quad (2.23)$$

L'expression du coefficient de diffusion monochromatique $\sigma_{dif,\lambda}$ est déduite, par comparaison, à partir des équations (2.22) et (2.23) :

$$\sigma_{dif,\lambda} = \int \int_{space} f_\lambda(\theta_d) d\Omega \quad (2.24)$$

Une fonction normalisée appelée *fonction de phase*, pour une longueur d'onde donné λ , notée $p_\lambda(\theta_d)$ est généralement introduite pour des raisons de simplification, définie comme suit :

$$\int \int_{space} p_\lambda(\theta_d) d\Omega = 4\pi \quad (2.25)$$

La fonction de phase monochromatique se déduit de la fonction de diffusion monochromatique à partir des équations (2.24) et (2.25) :

$$p_\lambda(\theta_d) = \frac{4\pi}{\sigma_{dif,\lambda}} f_\lambda(\theta_d) \quad (2.26)$$

L'extinction

Lors de la propagation du rayonnement, les phénomènes de diffusion et d'absorption peuvent se produire simultanément, et la somme de ces deux phénomènes

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

s'appelle l'extinction du rayonnement. Ainsi, les quantités comme le coefficient d'extinction et l'épaisseur optique d'extinction sont définis comme respectivement les sommes des coefficients et des épaisseurs optiques d'absorption et de diffusion pour une longueur d'onde spécifique λ :

$$\sigma_{ext,\lambda} = \sigma_{dif,\lambda} + \sigma_{abs,\lambda} \quad (2.27a)$$

$$\tau_{ext,\lambda} = \tau_{dif,\lambda} + \tau_{abs,\lambda} \quad (2.27b)$$

La transmittance d'extinction monochromatique $T_{e,\lambda}$ est ainsi définie par l'équation suivante :

$$T_{e,\lambda} = e^{-(\tau_{ext,\lambda})} \quad (2.28)$$

Pour connaître la proportion de diffusion par rapport à l'absorption, il existe la grandeur nommée *l'albédo de diffusion simple*. L'albédo de diffusion simple monochromatique, noté $\bar{\omega}_{0,\lambda}$, est défini comme le rapport entre le coefficient de diffusion monochromatique et le coefficient d'extinction monochromatique :

$$\bar{\omega}_{0,\lambda} = \frac{\sigma_{dif,\lambda}}{\sigma_{ext,\lambda}} \quad (2.29)$$

Lorsque l'albédo de diffusion simple vaut 1 alors le milieu est dit purement diffusant, et réciproquement purement absorbant lorsqu'il vaut 0.

2.1.5 La diffusion dans l'atmosphère

Un être humain qui observe le soleil depuis la surface terrestre n'observe pas directement le rayonnement solaire. Il observe, en regardant par exemple le ciel ou les nuages, le rayonnement solaire ayant subi plusieurs phénomènes physiques d'absorption et de diffusion par les composants atmosphériques (les molécules de gaz, les aérosols, les nuages, etc). En regardant le ciel, des différences de couleur sont observées, un ciel clair apparaîtra bleu et des nuages blancs. Cette diffé-

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

rence existe parce que la diffusion du rayonnement solaire diffère selon la taille des molécules/particules et la longueur d'onde du rayonnement à laquelle il y a interaction.

Selon la taille de la molécule/particule par rapport à la longueur d'onde, la fonction de phase de diffusion (répartition angulaire du rayonnement diffusé) sera aussi différente. Des exemples sont reportés sur la figure 2.5, qui montre trois formes de fonction de diffusion différente selon la taille d'une particule sphérique interagissant avec une longueur d'onde visible (550 nm). On note que pour les petites particules, la diffusion est presque isotrope et devient de plus en plus anisotrope lorsque la taille de la particule augmente avec une diffusion vers l'avant de plus en plus importante.

Dans la description de l'interaction des composants de l'atmosphère avec le rayonnement solaire, plusieurs régimes de diffusion peuvent être identifiés, dont les trois principaux sont schématiquement répartis sur la figure 2.6. La dépendance du rayonnement solaire à la taille des particules/molécules et la longueur d'onde est décrite par un terme appelé *paramètre de taille*. Pour une particule sphérique, le paramètre de taille x est défini par l'équation suivante :

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (2.30)$$

où r représente le rayon de la particule/molécule et λ la longueur d'onde à laquelle la diffusion se produit. Pour la partie du spectre solaire qui nous intéresse dans le cas des CST (entre 250 et 4000 nm), les régimes de diffusion sont la diffusion Rayleigh où x est compris entre 0,002 et 0,2 pour les interactions avec les molécules d'air et les petits aérosols (une fonction de phase ressemblant à l'image a de la figure 2.5), le régime de Mie pour x entre 0,2 et 2000 pour les aérosols de grande taille et les nuages liquides (une fonction de phase ressemblant aux images b et c de la figure 2.5). L'utilisation de l'optique géométrique pour des valeurs de x supérieures à 2000 peut être nécessaire dans le cas de diffusions par des particules de glace.

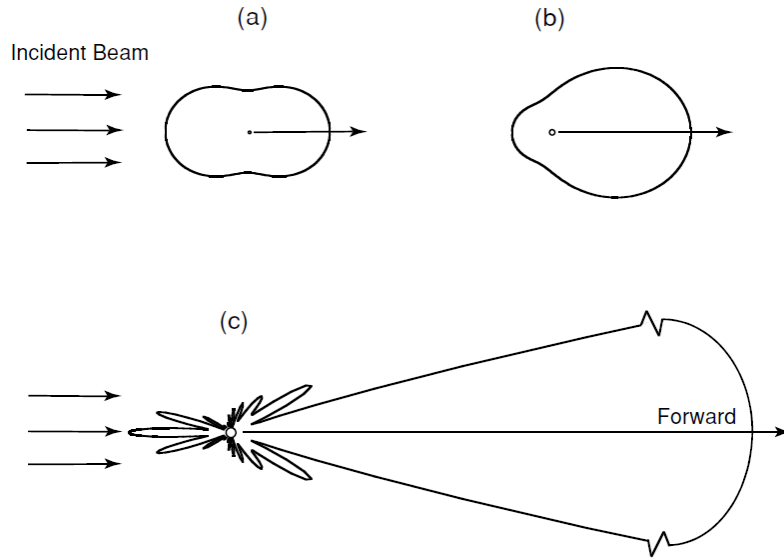


FIGURE 2.5 – Formes angulaires de diffusion à 500 nm pour trois tailles différentes d'aérosols sphériques : 10^{-4} μm (a), 0,1 μm (b) et 1 μm (c) [67].

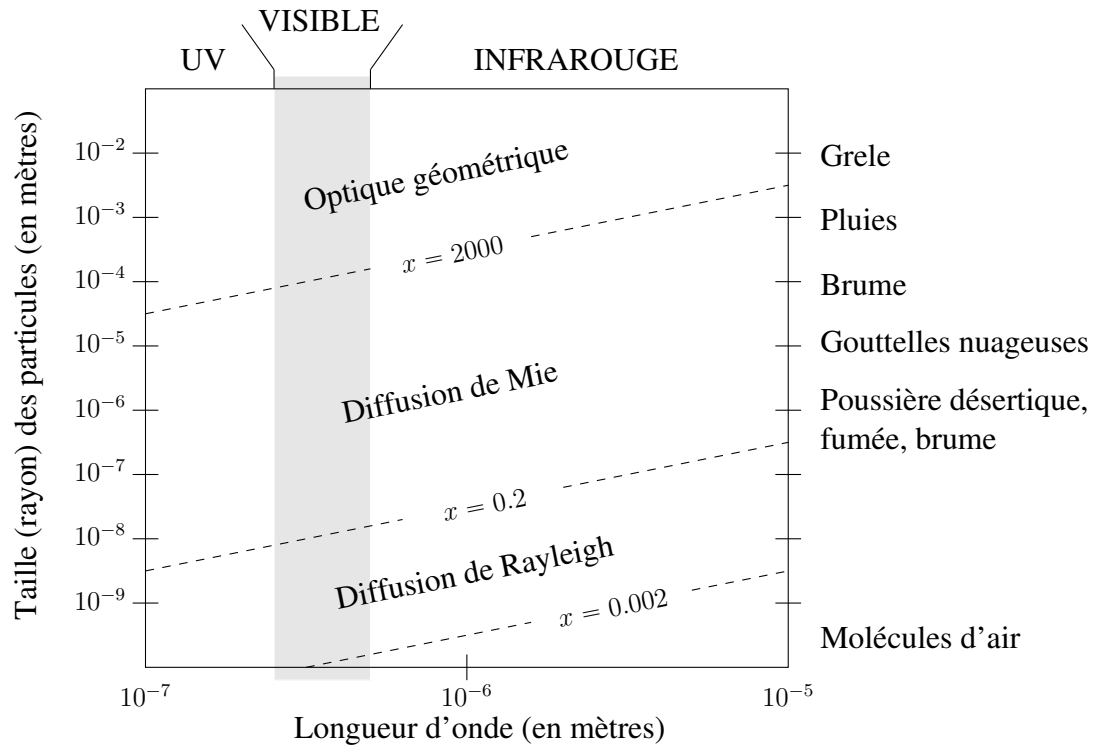


FIGURE 2.6 – Les trois principaux régimes de diffusion en fonction de la taille de la particule et de la longueur d'onde.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

2.1.6 L'équation de transfert radiatif

Pour décrire le transfert de l'énergie radiative dans l'atmosphère, en se basant sur un principe de conservation d'énergie, on établit à partir d'un bilan radiatif l'équation de transfert radiatif. Le raisonnement est le suivant : une luminance monochromatique L_λ , entre dans un volume élémentaire dv , avec un angle solide élémentaire $d\Omega$, donnant ainsi en sortie, une luminance monochromatique qui vaut $L_\lambda + dL_\lambda$. L'expression suivante du flux radiatif monochromatique élémentaire en entrée du volume élémentaire, noté $d\Phi_{1,\lambda}$ peut s'écrire :

$$d\Phi_{1,\lambda} = L_\lambda d\Omega dS \quad (2.31)$$

Et en sortie du volume élémentaire, le flux radiatif monochromatique élémentaire, noté $d\Phi_{2,\lambda}$ peut s'écrire :

$$d\Phi_{2,\lambda} = \left(L_\lambda + \frac{dL_\lambda}{dl} dl \right) d\Omega dS \quad (2.32)$$

où dS et dl représentent respectivement la section et la longueur du volume élémentaire dv .

Le flux radiatif monochromatique élémentaire perdu par extinction, noté $d\Phi_{3,\lambda}$, est défini par l'équation ci-dessous :

$$d\Phi_{3,\lambda} = -\sigma_{ext,\lambda} L_\lambda d\Omega dS \quad (2.33)$$

avec $\sigma_{ext,\lambda}$ le coefficient d'extinction monochromatique du volume élémentaire dv .

Enfin, il existe également un flux radiatif gagné, par de la diffusion, et par l'émission créée par le volume élémentaire lui-même, pour une longueur d'onde donnée λ , noté $d\Phi_{4,\lambda}$, défini comme ci-dessous :

$$d\Phi_{4,\lambda} = \sigma_{ext,\lambda} J_\lambda d\Omega dS \quad (2.34)$$

où J_λ est la fonction source monochromatique correspondant à la somme des

fonctions sources de diffusion et d'émission monochromatiques (pour l'étude des CST ce terme est négligé) respectivement $J_{dif,\lambda}$ et $J_{emi,\lambda}$:

$$J_\lambda = J_{dif,\lambda} + J_{emi,\lambda} \quad (2.35a)$$

$$J_{dif,\lambda} = \frac{\bar{\Omega}_{0,\lambda}}{4\pi} \int p_\lambda(\theta_d) L_{d,\lambda} d\Omega' \quad (2.35b)$$

$$J_{emi,\lambda} = (1 - \bar{\omega}_{0,\lambda}) L_{CN,\lambda} \quad (2.35c)$$

où $\bar{\omega}_{0,\lambda}$ représente l'albédo de diffusion simple, à la longueur d'onde λ ; $p_\lambda(\theta_d)$ et $L_{d,\lambda}$ respectivement la fonction de phase monochromatique dépendant de l'angle de diffusion θ_d et la luminance gagnée par diffusion. $L_{CN,\lambda}$ est la luminance monochromatique du corps noir, qui se retrouve en utilisant la loi de Planck :

$$L_{CN,\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[e^{\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right)} - 1 \right]} \quad (2.36)$$

avec h la constance de Plank, k la constante de Boltzmann, c la vitesse de la lumière dans le vide et T la température (en Kelvin).

Pour terminer, le bilan radiatif donne l'équation fondamentale de transfert radiatif :

$$\begin{aligned} d\Phi_2 &= d\Phi_1 + d\Phi_3 + d\Phi_4 \\ \Longleftrightarrow \quad \frac{dL_\lambda}{dl} &= -\sigma_{ext,\lambda} [L_\lambda - J_\lambda] \end{aligned} \quad (2.37)$$

2.2 Les méthodes de Monte-Carlo

2.2.1 Introduction

Les méthodes de Monte-Carlo désignent des méthodes qui permettent de calculer numériquement une valeur déterministe par des procédés aléatoires. L'origine du nom de Monte-carlo, vient du mathématicien Nicolas Metropolis, qui s'inspire du casino de Monte-Carlo, en référence à la passion pour les jeux de hasard de son collègue Stanislaw Ulam [70]. La première publication scientifique utilisant les méthodes de Monte-Carlo par Métropolis date de 1949 [71] ; d'autres publications plus anciennes, qui utilisent indirectement Monte-Carlo, existent également ; par exemple, au dix-huitième siècle, George-louis Leclerc, Comte de Buffon, propose une méthode expérimentale, appelé *l'aiguille de buffon*, qui permet d'approcher par procédés aléatoires le nombre π [72, 73].

Les méthodes de Monte-Carlo sont aujourd'hui utilisées dans divers domaines, comme la finance, l'économie, les sciences de l'atmosphère, les sciences des plasmas, etc. L'intérêt des méthodes de Monte-Carlo réside dans la convergence vers la solution en $1/\sqrt{N}$ (N est le nombre d'échantillons) quelque soit la dimension du problème ; alors que, par exemple, avec la méthode des rectangles, la convergence est $1/N^{\frac{1}{x}}$ (x est le nombre de dimensions) et dépend donc du nombre de dimensions [74].

Dans cette thèse, l'outil exploité est un code de transfert radiatif qui utilise les méthodes de Monte-Carlo, pour résoudre l'équation de transfert radiatif dans l'atmosphère. Les développements effectués dans le code de transfert radiatif et présentés dans les prochains chapitres, nécessitent certaines connaissances des méthodes de Monte-Carlo, d'où le rappel dans cette section, des bases essentielles au suivi des travaux menés.

La section commence avec les définitions des outils mathématiques de base utilisés par les méthodes de Monte-Carlo, et se termine en présentant deux exemples qui seront utilisés dans les chapitres à venir.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

2.2.2 Rappel de quelques définitions

Soit un ensemble $\mathcal{U}$, une tribu $\mathcal{A}$ et une mesure de probabilité $\mathbb{P}$, tel que $\mathbb{P}(\mathcal{U})=1$. L'ensemble $\mathcal{U}$ est appelé univers et les éléments de la tribu $\mathcal{A}$ sont appelés des événements (ou ensembles mesurables de $\mathcal{U}$). En théorie de probabilité, nous appelons espace de probabilité le triplet $(\mathcal{U}, \mathcal{A}, \mathbb{P})$.

Exemple simple :

Soit un dé à 6 faces, avec pour chaque face un nombre allant de 1 à 6, cela donne un ensemble $\mathcal{U} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. On considère les événements A_1 et A_2 de la tribu $\mathcal{A}$, tels que A_1 représente les faces impaires et A_2 les faces paires, c'est-à-dire $A_1 = \{1, 3, 5\}$ et $A_2 = \{2, 4, 6\}$. Les mesures de probabilités sont donc : $\mathbb{P}(\mathcal{U}) = 6/6 = 1$, $\mathbb{P}(A_1) = 3/6 = 0.5$ et $\mathbb{P}(A_2) = 3/6 = 0.5$.

Quelques définitions sur les ensembles :

- Un ensemble est une collection d'éléments. Exemple : $\{\alpha \in \mathbb{R} \mid -1 \leq \alpha \leq 1\} = [-1, 1]$. L'ensemble vide $\emptyset$, est l'ensemble qui ne comporte aucun élément. Si α est un élément de $\mathcal{U}$ alors on note $\alpha \in \mathcal{U}$, et $\alpha \notin \mathcal{U}$ dans le cas contraire.
- $A \subset \mathcal{U}$: L'ensemble A inclus dans l'univers $\mathcal{U}$.
- $A_1 \cup A_2$: A_1 union A_2 . Par exemple, $\alpha \in A_1 \cup A_2$ signifie que α doit appartenir à A_1 ou (non exclusif) à A_2 .
- $A_1 \cap A_2$: A_1 inter A_2 . $\alpha \in A_1 \cap A_2$ signifie que α doit appartenir à la fois à A_1 et à A_2 .

La probabilité d'un événement A , $\mathbb{P}(A)$, doit satisfaire les trois conditions :

1. $\mathbb{P}(A) \geq 0$
2. Si nous sommes certains d'obtenir l'événement A , $\mathbb{P}(A) = 1$
3. Si tous les événements A_i sont mutuellement exclusifs (i.e. ne comportent aucun élément en commun, qui ne peuvent donc pas se réaliser en même temps) alors : $\mathbb{P}(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_\infty) = \sum_{i=1}^{\infty} \mathbb{P}(A_i)$

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Variable aléatoire continue :

Une variable aléatoire continue X est une fonction à valeur réelle qui dépend d'une expérience aléatoire, et où les valeurs possibles de X sont réparties de façon continue sur un intervalle.

2.2.3 Fonctions de densité de probabilité et distribution cumulative

La fonction de densité de probabilité

Une fonction de densité de probabilité (abrégée PDF pour Probability Density Function en anglais) d'une variable aléatoire continue X , notée $p_X(x)$, est une fonction avec les trois propriétés suivantes :

- Soit $a, b \in \mathbb{R}$, la fonction $p_X(x)$ est délimitée dans un intervalle $[a, b]$ avec $a < b$.
- La fonction $p_X(x)$ est toujours ≥ 0 dans $[a, b]$.
- La fonction $p_X(x)$ est toujours normalisée comme ci-dessous :

$$\int_a^b p_X(x) dx = 1 \quad (2.38)$$

La probabilité qu'une variable aléatoire continue X sorte une valeur comprise dans l'intervalle $[\alpha, \beta]$, avec $a < \alpha < \beta < b$, est donnée par l'intégrale de la PDF $p_X(x)$:

$$\mathbb{P}(\alpha \leq X \leq \beta) = \int_{\alpha}^{\beta} p_X(x) dx \quad (2.39)$$

Si un couple de deux variables aléatoires X et Y est distribué selon une PDF conjointe $p_{X,Y}(x, y)$, alors la PDF conditionnelle $p_{X|Y}(x|y)$ est donnée par l'équation qui suit :

$$p_{X|Y}(x|y) = \frac{p_{X,Y}(x, y)}{p_Y(y)} dx \quad (2.40)$$

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

La PDF marginale $p_Y(y)$ est reliée à la PDF conjointe $p_{X,Y}(x, y)$ par l'intégrale ci-dessous :

$$p_Y(y) = \int_a^b p_{X,Y}(x, y) dx \quad (2.41)$$

La fonction de distribution cumulative

La fonction de distribution cumulative (abrégée CDF pour Cumulative Density Function en anglais) d'une variable aléatoire X , notée $c_X(x)$, est définie par l'équation ci-dessous :

$$c_X(x) = \int_a^x p_X(x') dx' \quad (2.42)$$

où $p_X(x)$ une PDF délimitée dans l'intervalle $[a, b]$.

La CDF $c_X(x)$ comporte les propriétés suivantes :

- $c_X(a) = 0$ et $c_X(b) = 1$ (car par définition : $\int_b^a p_X(x) dx = 1$).
- $c_X(x)$ est une fonction monotone croissante, car par définition $p_X(x) \geq 0$.

2.2.4 L'espérance, la variance et l'écart-type

L'espérance

L'espérance d'une variable aléatoire continue X , délimitée par les valeurs a et b , avec $a < b$, avec une PDF $p_X(x)$, est définie par l'équation ci-dessous :

$$\mathbb{E}[X] = \int_a^b x p_X(x) dx \quad (2.43)$$

L'estimation de l'espérance $\mathbb{E}[X]$ à partir de N échantillons consiste à calculer la moyenne empirique, notée $\bar{X}$:

$$\mathbb{E}[X] \approx \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.44)$$

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

où N représente le nombre d'échantillons et x_i les valeurs échantillonnées. Plus le nombre d'échantillons N est grand plus l'estimation est précise, et cela est justifié par la loi forte des grands nombres, énoncée plus loin dans la section 2.2.5. Les méthodes de Monte-Carlo sont basés sur ce principe d'échantillonnage et d'espérance mathématique.

Propriétés de l'espérance $\mathbb{E}[X]$:

- **Propriété 1** : Soit $Y = aX + b$ où X est une variable aléatoire et a, b des constantes, alors : $\mathbb{E}[Y] = a\mathbb{E}[X] + b$.
- **Propriété 2** : Si X égale à une constante c , alors : $\mathbb{E}[X] = \mathbb{E}[c] = c$.
- **Propriété 3** : L'espérance de la somme de plusieurs variables aléatoires indépendantes $X, Y, \dots$ vaut la somme des espérances de ces valeurs aléatoires, par exemple : $\mathbb{E}[X + Y] = \mathbb{E}[X] + \mathbb{E}[Y]$.

La variance et l'écart-type

La variance, noté $\mathbb{V}[X]$, est la quantité qui nous permettra de mesurer la dispersion des valeurs échantillonnées selon un indice de confiance prédéfini (voir section 2.2.5). Elle est définie comme l'espérance de la différence au carré entre la variable aléatoire X et son espérance $\mathbb{E}[X]$:

$$\mathbb{V}[X] = \mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])^2] = \mathbb{E}[X^2] - \mathbb{E}[X]^2 \quad (2.45)$$

Le développement de l'équation ci-dessus se retrouve, en utilisant les propriétés sur l'espérance citées précédemment :

$$\mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])^2] = \mathbb{E}[X^2 - 2X\mathbb{E}[X] + \mathbb{E}[X]^2]$$

$\Longleftrightarrow$

$$\mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])^2] = \mathbb{E}[X^2] - 2\mathbb{E}[X]\mathbb{E}[X] + \mathbb{E}[X]^2$$

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

$\Longleftrightarrow$

$$\mathbb{E}[(X - \mathbb{E}[X])^2] = \mathbb{E}[X^2] - \mathbb{E}[X]^2$$

L'écart-type est définie comme la racine carré de la variance :

$$\sigma[X] = \sqrt{\mathbb{V}[X]} \quad (2.46)$$

L'estimation de la variance non biaisée, appelé *variance d'échantillon*, noté $\mathbb{V}_{ech}[X]$, s'obtient avec l'équation ci-dessous :

$$\mathbb{V}[x] \approx \mathbb{V}_{ech}[X] = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{X})^2}{N-1} = \frac{N}{N-1} (\overline{X^2} - \bar{X}^2) \quad (2.47)$$

où $\bar{X}$ est la moyenne empirique, x_i une valeur échantillonnée aléatoirement et N le nombre d'échantillons.

L'estimation de l'écart-type, appelé *l'erreur standard* dans le cas Monte-Carlo, noté $\sigma_{ech}[X]$, est définie selon l'équation suivante :

$$\sigma[X] \approx \sigma_{ech}[X] = \sqrt{\mathbb{V}_{ech}[X]} \quad (2.48)$$

Voici quelques propriétés liées à la variance $\mathbb{V}[X]$:

- **Propriété 1 :** Si X vaut une constante c , ça signifie que $\mathbb{P}(X=c) = 1$, et alors : $\mathbb{V}[X] = 0$.
- **Propriété 2 :** Pour $Y = aX + b$, nous avons : $\mathbb{V}[Y] = a^2\mathbb{V}[X]$.
- **Propriété 3 :** Comme pour l'espérance, pour X et Y des variables aléatoires indépendantes, nous aurons : $\mathbb{V}[X + Y] = \mathbb{V}[X] + \mathbb{V}[Y]$.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

2.2.5 Loi forte des grands nombres et théorème centrale limite

La loi forte des grands nombres

La justification des méthodes de Monte-Carlo repose sur la loi forte des grands nombres. Nous souhaitons obtenir l'espérance d'une variable aléatoire X selon l'équation (2.43), qui est estimé par calcul Monte-Carlo avec la moyenne empirique [voir l'équation (2.44)], où les valeurs x_i sont échantillonnées aléatoirement suivant la PDF $p_X(x)$; la loi forte des grands nombres dit :

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \bar{X}_N = \mathbb{E}[X] \quad (2.49)$$

Il existe plusieurs preuves montrant la loi ci-dessus, le livre de Carl Graham et Denis Talay comporte l'une d'elles, avec l'utilisation des techniques des martingales [75].

Théorème centrale limite

En plus de l'estimation de l'espérance, les méthodes de Monte-Carlo fournissent également une estimation de l'incertitude avec un indice de confiance pré-défini, grâce au théorème centrale limite, qui s'écrit :

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \mathbb{P} \left[a \leq \frac{\sqrt{N} (\bar{X} - \mathbb{E}[X])}{\sigma[X]} \leq b \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (2.50)$$

où $\mathbb{E}[X]$ représente l'espérance de la variable aléatoire X , N le nombre d'échantillons, $\bar{X}$ la moyenne empirique et $\sigma[X]$ l'écart-type ; avec $a, b \in \mathbb{R}$ et $a < b$.

En posant λ comme la valeur maximale des valeurs absolues de a et de b [$\lambda = \max(|a|, |b|)$], l'équation (2.50) devient :

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \mathbb{P} \left[\frac{\sqrt{N} |\bar{X} - \mathbb{E}[X]|}{\sigma[X]} \leq \lambda \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\lambda}^{\lambda} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (2.51)$$

En approximant l'écart-type $\sigma[X]$ par l'erreur standard $\sigma_{ech}[X]$ dans l'équation (2.51) :

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

$$\begin{aligned}
& \lim_{N \rightarrow \infty} \mathbb{P} \left[\frac{\sqrt{N} |\bar{X} - \mathbb{E}[X]|}{\sigma_{ech}[X]} \leq \lambda \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\lambda}^{\lambda} e^{-\frac{u^2}{2}} du \\
& \iff \\
& \lim_{N \rightarrow \infty} \mathbb{P} \left[|\bar{X} - \mathbb{E}[X]| \leq \frac{\lambda \sigma_{ech}[X]}{\sqrt{N}} \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\lambda}^{\lambda} e^{-\frac{u^2}{2}} du \\
& \iff \\
& \lim_{N \rightarrow \infty} \mathbb{P} \left[\bar{X} - \frac{\lambda \sigma_{ech}[X]}{\sqrt{N}} \leq \mathbb{E}[X] \leq \bar{X} + \frac{\lambda \sigma_{ech}[X]}{\sqrt{N}} \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\lambda}^{\lambda} e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad (2.52)
\end{aligned}$$

A partir du théorème central limite, l'espérance (moyenne d'une population) est donc estimée par l'expression ci-dessous :

$$\mathbb{E}[X] \approx \bar{X} \pm \frac{\lambda \sigma_{ech}[X]}{\sqrt{n}} \quad (2.53)$$

où λ est une quantité de la loi normale liée à l'indice de confiance de l'estimation donnée sur l'incertitude de l'espérance. Par exemple, l'équation (2.53), avec $\lambda = 1$, donne une estimation de l'incertitude avec un indice de confiance d'environ 68% :

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-1}^1 e^{-\frac{u^2}{2}} du \approx 0,6827 \quad (2.54)$$

Parmi les autres valeurs classiquement utilisées de λ , il y a les valeurs 2, 3 et 4, pour respectivement des indices de confiance d'environ 95, 99 et 99,99 %.

2.2.6 Méthode d'inversion de la fonction de distribution cumulative

Une CDF est par définition une fonction monotone est croissance entre 0 et 1 ; cela permet d'affirmer l'existence de deux CDF $c_X(x)$ et $c_Y(y)$, où la probabilité que $X \leq x_i$ égale à la probabilité que $Y \leq y_i$:

$$c_X(x_i) = c_Y(y_i) \quad (2.55)$$

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Soit ζ_i une valeur échantillonnée aléatoirement suivant une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 1]$. Ce qui donne une PDF $p_\zeta(\zeta)=1$, et ainsi une CDF $c_\zeta(\zeta_i) = \zeta_i$. En remplaçant la CDF $c_Y(y_i)$ par ζ_i dans l'équation (2.55) nous obtenons ainsi l'expression suivante :

$$c_X(x_i) = \zeta_i \quad (2.56)$$

Enfin, pour connaître les valeurs des échantillons x_i suivant la PDF désirée $[p_X(x)]$, il faut résoudre l'équation qui suit :

$$x_i = c_X^{-1}(\zeta_i) \quad (2.57)$$

2.2.7 Deux exemples utilisant la méthode d'inversion

La distribution uniforme dans le cône de l'exemple 1 nous servira plus tard à considérer l'angle solide solaire dans l'un des modes de lancement développés [mode de lancement A₂, voir chapitre 3, équation (3.14)] ; la distribution lambertienne dans une demi-sphère de l'exemple 2, servira quant à elle à échantillonner le rayonnement solaire en sens inverse depuis le récepteur d'une CST (dans toutes les directions de l'hémisphère avant de la surface du récepteur) jusqu'au sommet de l'atmosphère [mode de lancement B, voir équation (3.21)]. Pour plus d'exemples, il existe un rassemblement élaboré par Phillip Dutré [76], avec également d'autres méthodes d'échantillonnages pour différentes formes (sphère complète, triangle, etc.).

Exemple 1 : distribution uniforme dans un cône :

Nous souhaitons dans cet exemple échantillonner uniformément des directions à l'intérieur d'un cône. Pour cela, nous utilisons les coordonnées sphériques suivant la convention de la figure 2.3, avec θ et φ respectivement les angles zénithal et azimutal. La PDF conjointe $p_{\theta,\varphi}(\theta, \varphi)$, se détermine en partant de l'intégrale per-

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

mettant le calcul de la surface d'un cône depuis une portion de sphère, dont l'angle solide élémentaire $d\Omega$ vaut $\sin\theta d\theta d\varphi$ (confère la section sur l'angle solide 2.1.2) :

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_c} \underbrace{k \sin\theta}_{=p_{\theta,\varphi}(\theta,\varphi)} d\theta d\varphi = 1 \quad (2.58)$$

où θ_c est une constante selon la taille du cône, avec $0 < \theta_c < \pi/2$; et k une constante qui se retrouve à partir de l'équation (2.58) :

$$k = \frac{1}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_c} \sin\theta d\theta d\varphi} = \frac{1}{2\pi(1 - \cos\theta_c)} \quad (2.59)$$

Ce qui donne pour la PDF conjointe $p_{\theta,\varphi}(\theta, \varphi)$, le résultat suivant :

$$p_{\theta,\varphi}(\theta, \varphi) = \frac{\sin\theta}{2\pi(1 - \cos\theta_c)} \quad (2.60)$$

Les PDF marginales $p_\theta(\theta)$ et $p_\varphi(\varphi)$, se retrouvent selon l'équation (2.41) à partir de la PDF conjointe $p_{\theta,\varphi}(\theta, \varphi)$:

$$p_\theta(\theta) = \int_0^{2\pi} p_{\theta,\varphi}(\theta, \varphi) d\varphi = \frac{1}{2\pi(1 - \cos\theta_c)} \quad (2.61a)$$

$$p_\varphi(\varphi) = \int_0^{\theta_c} p_{\theta,\varphi}(\theta, \varphi) d\theta = \frac{1}{2\pi} \quad (2.61b)$$

Les PDF $p_\theta(\theta)$ et $p_\varphi(\varphi)$ permettent, à partir de la définition de l'équation (2.42), de calculer les CDF $c_\theta(\theta_i)$ et $c_\varphi(\varphi_i)$:

$$c_\theta(\theta_i) = \int_0^{\theta_i} p_\theta(\theta) d\theta = \frac{\theta_i}{1 - \cos\theta_c} \quad (2.62a)$$

$$c_\varphi(\varphi_i) = \int_0^{\varphi_i} p_\varphi(\varphi) d\varphi = \frac{\varphi_i}{2\pi} \quad (2.62b)$$

Enfin, la dernière étape consiste à utiliser la méthode d'inversion de la CDF, ce qui permet de retrouver les valeurs échantillonnées de θ_i et φ_i , grâce à ζ_i qui est une valeur échantillonnée suivant la loi uniforme dans l'intervalle $[0, 1]$:

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

$$\theta_i = (1 - \cos\theta_c)\zeta_i \quad (2.63a)$$

$$\varphi_i = 2\pi \zeta_i \quad (2.63b)$$

Exemple 2 : la distribution lambertienne dans une demi-sphère :

L'intensité d'une luminance réfléchie dans un plan, est proportionnelle au cosinus de l'angle entre la normale de cette surface et la direction de la luminance. Pour effectuer une distribution isotrope de l'intensité dans toutes les directions, il faut donc une pondération en cosinus : c'est ce qu'on appelle la distribution lambertienne, ou Cosine-Weighted Sampling [77].

Comme pour l'exemple 1, les coordonnées sphériques sont utilisées, avec θ et φ les angles zénithal et azimutal avec θ qui varie entre 0 et $\pi/2$ (demi-sphère), et φ entre 0 et 2π .

La PDF conjointe $p_{\theta,\varphi}(\theta, \varphi)$, proportionnelle à $\cos\theta$, se retrouve cette fois-ci par l'équation ci-dessous :

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \underbrace{k \cos\theta \sin\theta}_{=p_{\theta,\varphi}(\theta,\varphi)} d\theta d\varphi &= 1 \\ \iff \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \underbrace{\frac{k \sin(2\theta)}{2}}_{=p_{\theta,\varphi}(\theta,\varphi)} d\theta d\varphi &= 1 \end{aligned} \quad (2.64)$$

où k représente une constante.

En suivant la méthodologie utilisée dans l'exemple 1, voici les fonctions de densité de probabilité $p_\theta(\theta)$ et $p_\varphi(\varphi)$:

$$p_\theta(\theta) = 2 \cos\theta \sin\theta \quad (2.65a)$$

$$p_\varphi(\varphi) = \frac{1}{2\pi} \quad (2.65b)$$

Avec les CDF $c_\theta(\theta_i)$ et $c_\varphi(\varphi_i)$:

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

$$c_\theta(\theta_i) = \frac{1 - \cos(2\theta_i)}{2} = 1 - \cos^2\theta_i \quad (2.66a)$$

$$c_\varphi(\varphi_i) = \frac{\varphi_i}{2\pi} \quad (2.66b)$$

Ce qui permet finalement d'avoir les valeurs échantillonnées θ_i et φ_i comme suit :

$$\theta_i = \arccos(\sqrt{\zeta_i}) \quad (2.67a)$$

$$\varphi_i = 2\pi\zeta_i \quad (2.67b)$$

où ζ_i est une valeur échantillonnée suivant la loi uniforme entre 0 et 1.

Chapitre 3

Méthode pour estimer le flux collecté avec un code de transfert radiatif atmosphérique : application au code SMART-G

Dans ce chapitre, une nouvelle méthode pour calculer le flux solaire collecté par une CST est présentée. Elle permet de simuler intégralement, avec un code de transfert radiatif atmosphérique Monte-Carlo, le rayonnement solaire depuis l'espace jusqu'au récepteur d'une centrale solaire à tour. Une estimation plus réaliste du flux collecté par le récepteur de la centrale est ainsi calculée. Le chapitre commence en rappelant certaines particularités des codes de transfert radiatif atmosphérique Monte-Carlo, en se focalisant sur le code utilisé dans cette thèse, le code SMART-G. Les différentes étapes nécessaires à la mise en place de la méthode développée sont ensuite énoncées. Il s'agit de l'insertion d'objets 3D (les héliostats) dans une atmosphère réaliste et des deux manières d'obtenir l'ensemble des contributions sur le flux collecté qui proviennent de la réflexion des héliostats et des multiples chemins optiques atmosphérique possibles (rayonnement diffus, réfléchi par le sol, etc.). La propagation du rayonnement peut être suivi depuis l'espace jusqu'au récepteur ou en sens inverse depuis le récepteur jusqu'au soleil.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Sommaire

3.1	Transfert radiatif par méthodes de Monte-Carlo : le code SMART-G	55
3.2	Incorporation of 3D objects in a realistic atmosphere	57
3.2.1	Cas d'une atmosphère purement absorbante	58
3.2.2	Cas d'une atmosphère absorbante et diffusante	61
3.2.3	Validation	63
3.3	Le lancement des photons pour considérer les multiples contributions atmosphériques	71
3.3.1	Le mode de lancement A : suivi en "forward"	73
3.3.2	Le mode de lancement B : suivi en "backward"	78
3.4	Conclusion	81

3.1 Transfert radiatif par méthodes de Monte-Carlo : le code SMART-G

Les codes de Transfert Radiatif Atmosphérique (TRA) Monte-Carlo, simulent la propagation de la lumière à travers le lancement d'une grande quantité de rayons solaires, appelés photons. Ces photons se propagent dans l'atmosphère et peuvent être en partie ou totalement absorbés ou diffusés par les composants atmosphériques. Cette prise en compte des interactions rayonnement-atmosphère propre aux codes de transfert radiatif atmosphérique par Monte-Carlo permettent 1) une intégration facile des méthodes utilisées par les codes de ray tracing sur les interactions rayons et objets 3D, donnant la possibilité de modéliser directement une centrale solaire à tour sur un code de TRA Monte-Carlo ; et 2) de considérer les multiples contributions atmosphériques sur le flux collecté par les CST jusqu'à aujourd'hui négligées. On comptabilise ainsi les contributions de tout le rayonnement solaire lié aux processus de diffusion : par exemple, le rayonnement solaire réfléchi par le champ d'héliostats subissant une diffusion avant, le rayonnement solaire diffus atteignant directement le récepteur, etc (voir chapitre 5 qui détaille les différents gains possibles section 5.2).

Dans cette thèse le code que nous avons choisi d'utiliser est SMART-G (Speed-Up Monte-Carlo Advanced Radiative Transfer code with GPU) [16]. C'est un code de TRA Monte-Carlo qui simule la propagation de la lumière polarisée, monochromatique ou intégrée spectralement, dans une atmosphère plan-parallèle ou sphérique. Le code utilise la technologie GPGPU (General-Purpose computation on Graphic Processing Units) avec d'autres méthodes (ALIS [78], estimation locale [79], etc.) pour accélérer les simulations tout en gardant une bonne précision. Le code SMART-G est ainsi reconnu comme l'un des codes de TRA Monte-Carlo les plus rapides.

L'interaction entre des rayons et une centrale solaire à tour (ensemble d'objets 3D) est classiquement réalisée dans les codes de ray tracing, mais n'a jamais été effectuée dans le cas de codes de TRA Monte-Carlo, deux étapes supplémentaires

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

de développement sont nécessaires. La première étape consiste à prendre en considération le milieu atmosphérique, qui peut par exemple rendre caduque un test d'intersection avec objet 3D du fait de la diffusion. La deuxième étape consiste à permettre la considération de toutes les contributions atmosphériques arrivant sur la surface du récepteur.

Dans ce chapitre, la méthode permettant de modéliser le flux collecté par une CST avec un code de TRA Monte-Carlo, ici avec le code SMART-G, est présentée en deux parties : la première partie montre comment prendre en considération des objets 3D dans une atmosphère plan-parallèle absorbante et diffusante et la deuxième partie explicite deux méthodes de lancements des photons permettant de considérer les multiples contributions possibles aux flux collecté.

Comme SMART-G est le code de TRA Monte-Carlo choisi, les conventions utilisées dans ce code sont reprises, à savoir :

- Une atmosphère 1D plan-parallèle décrite verticalement par une succession de couches non-homogènes (première couche peut représenter la portion d'atmosphère du sol à 1 km d'altitude, et la deuxième la portion de 1 km à 3 km).
- Une répartition de ces couches qui commence du sommet de l'atmosphère (abrégié TOA) pour aller jusqu'au sol, avec un axe z (l'altitude) orienté vers le haut.
- Une distribution des composants atmosphériques qui peut différer selon la couche atmosphérique mais homogène à l'intérieur d'une même couche.
- Une considération de l'absorption qui se fait par un paramètre poids assigné à chaque photon.
- Une prise en compte de la diffusion par un changement de direction des photons.

3.2 Incorporation of 3D objects in a realistic atmosphere

Dans cette section, les développements effectués pour considérer la présence d'objets 3D dans une atmosphère 1D plan-parallèle absorbante et diffusante sont présentés. Au préalable, plusieurs routines ont été implémentées dans SMART-G pour simuler l'interaction entre un objet 3D (i.e., un héliostat, un récepteur, etc) et un photon. Ces routines s'inspirent des seconde et troisième éditions du livre *Physically Based Rendering : From Theory to Implementation* [77, 80], et ont été adaptées pour fonctionner avec un code parallélisé avec la plate-forme CUDA (Compute Unified Device Architecture). A partir de la connaissance de la position et de la direction initiales d'un photon, ces routines fournissent la nouvelle position du photon à l'intersection avec l'objet le plus proche.

Par exemple, un test d'intersection se révèle être positif (test qui ne considère pas les obstacles potentiels que sont les composants atmosphériques), ainsi la nouvelle position du photon à l'intersection avec l'objet 3D le plus proche est calculée. De là, en considérant l'atmosphère comme purement absorbante (non réaliste), il peut être supposé légitimement que le photon atteigne la position à l'intersection, du moment que son poids soit pondéré par la transmittance d'absorption. Cependant, avec une atmosphère réaliste (absorbante et diffusante), il devient nécessaire de savoir s'il y a interaction avec un composant atmosphérique le long de ce trajet.

Dans un premier temps, pour des raisons de simplification et de clarté, la méthode est présentée pour le cas d'une atmosphère purement absorbante. Ensuite le même cas est repris mais cette fois-ci avec la prise en compte de la diffusion atmosphérique. A la fin de la section, des tests permettant de vérifier le bon fonctionnement de la méthode sont présentés.

Également pour des raisons de simplification, tout au long de la section le terme "épaisseur optique" est utilisé pour faire référence à l'épaisseur optique monochromatique d'absorption atmosphérique totale (somme des épaisseurs optiques

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

aérosols, gaz et nuages).

3.2.1 Cas d'une atmosphère purement absorbante

Pour commencer, l'atmosphère est supposée purement absorbante. La figure 3.1 décrit le chemin parcouru par un photon dans une telle atmosphère, qui démarre d'un point initial p_a jusqu'à son intersection p_{int} , avec un objet 3D situé à l'intérieur d'une couche c_i . Sur la figure 3.1, l'image d'en haut représente le cas où le photon a une direction descendante (vers le sol), et celle d'en bas le cas où le photon a une direction montante (vers TOA); τ_a et τ_{int} sont respectivement les épaisseurs optiques verticales du sol jusqu'aux positions initiale et d'intersection du photon; $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ est le vecteur de direction normalisé du photon; z_i et τ_i représentent respectivement l'altitude de la surface de la couche c_i et l'épaisseur optique depuis la surface de la couche c_i jusqu'à TOA; enfin, τ_{atm} représente l'épaisseur optique verticale du sol jusqu'à TOA.

La nouvelle position du photon p_{int} est connue (retrouvée à partir des routines de ray tracing). Les paramètres recherchés (en vert sur la figure 3.1) sont l'épaisseur optique verticale du photon du sol à sa nouvelle position τ_{int} , l'épaisseur optique entre cette position et le sommet de la couche $d\tau$ et l'épaisseur optique oblique entre sa position initiale et finale τ_{ob_int} . En repartant du fait que le photon parcourt l'atmosphère depuis une position initiale p_a dans la direction $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$, il existe trois cas de figure : le photon va **1)** dans une direction montante i.e. $u_z > 0$; **2)** dans une direction descendante i.e. $u_z < 0$; ou **3)** dans une direction horizontale i.e. $u_z = 0$. Les équations sont les mêmes pour retrouver τ_{int} et τ_{ob_int} pour les premier et deuxième cas et sont déduites directement à

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

partir des deux schémas de la figure 3.1 :

$$d\tau = \frac{(z_{i-1} - z_{int})\Delta\tau_i}{\Delta z_i} \quad (3.1a)$$

$$\tau_{int} = \tau_{atm} - (d\tau + \tau_{i-1}) \quad (3.1b)$$

$$\tau_{ob_int} = \frac{\tau_{int} - \tau_a}{u_z} \quad \text{avec } u_z \neq 0 \quad (3.1c)$$

avec $\Delta\tau_i$ et Δz_i les épaisseurs optiques et géométriques de la couche c_i .

Dans le troisième cas de figure, le photon parcourt l'atmosphère horizontalement ; il restera donc toujours dans la même couche c_i jusqu'à son intersection avec l'objet 3D. Avec une épaisseur optique linéaire (homogène dans la couche c_i) les valeurs de τ_{int} et τ_{ob_int} se retrouvent facilement à partir des équations ci-dessous :

$$\tau_{int} = \tau_a \quad (3.2a)$$

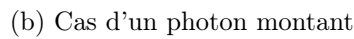
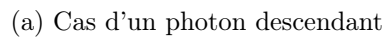
$$d_{ob_int} = \sqrt{(x_{int} - x_a)^2 + (y_{int} - y_a)^2} \quad (3.2b)$$

$$\tau_{ob_int} = \frac{d_{ob_int} \cdot \Delta\tau_i}{\Delta z_i} \quad (3.2c)$$

où d_{ob_int} est la distance géométrique entre les points p_a et p_{int} .

Une fois l'épaisseur optique oblique calculée, pour considérer l'absorption atmosphérique il ne reste plus qu'à multiplier le poids du photon avec la transmittance T , qui vaut :

$$T = e^{-\tau_{ob_int}} \quad (3.3)$$



TOA. En vert, les grandeurs à calculer

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

3.2.2 Cas d'une atmosphère absorbante et diffusante

Dans cette section, l'extinction par diffusion est également considérée. L'épaisseur optique oblique entre la position initiale d'un photon jusqu'à sa collision avec un composant atmosphérique est déterminée aléatoirement en utilisant la loi de Beer-Lambert [16] :

$$\tau_{ob_col} = -\ln(\zeta) \quad (3.4)$$

où ζ est une valeur aléatoire comprise entre 0 et 1. La distance parcourue par le photon avant collision dépendra de ce tirage aléatoire et de l'épaisseur optique du milieu. Par exemple, un photon parcourt verticalement l'atmosphère de TOA jusqu'au sol, le tirage aléatoire selon l'équation (3.4) donne une épaisseur optique de 1,5. Si l'épaisseur optique verticale du sol à TOA est supérieure à 1,5, alors il y aura collision avec un composant atmosphérique, dans le cas contraire il y aura intersection avec le sol. En clair, plus l'épaisseur optique du milieu est grande, plus il y a de chance qu'il y ait collision du photon avec un composant atmosphérique.

La figure 3.2 représente cette fois-ci le chemin parcouru par un photon démarant d'un point p_a jusqu'à sa collision avec un composant atmosphérique situé dans la couche c_i . Les définitions des paramètres communs des figures 3.1 et 3.2 restent les mêmes ; sur la figure 3.2, $p_{col} = (x_{col}, y_{col}, z_{col})$ et τ_{col} décrivent respectivement la position du photon à la collision et l'épaisseur optique verticale du sol au point de collision. τ_{ob_col} , obtenu à partir de l'équation (3.4), représente l'épaisseur optique oblique entre les positions initiale et de collision. Les paramètres à déterminer sont la position du photon à l'endroit de la collision p_{col} et l'épaisseur optique verticale du sol au point de collision τ_{col} . La détermination de ces deux paramètres s'établit, comme précédemment, suivant trois cas de figure : le photon vient **1)** d'en bas avec $u_z > 0$, **2)** d'en haut avec $u_z < 0$ ou **3)** horizontalement avec $u_z = 0$. Ils se déduisent à partir de la figure 3.2 pour les premier et deuxième

cas de figure :

$$\tau_{col} = \tau_a + (u_z \cdot \tau_{ob_col}) \quad \text{avec} \quad u_z \neq 0 \quad (3.5a)$$

$$d\tau = \tau_{atm} - (\tau_{col} + \tau_{i-1}) \quad (3.5b)$$

$$z_{col} = z_{i-1} - \frac{\Delta z_i \cdot d\tau}{\Delta \tau_i} \quad (3.5c)$$

La position initiale du photon p_a , la direction du photon $\vec{u}$ et l'altitude à la collision z_{col} sont dorénavant tous des paramètres connus. Il est donc assez simple de retrouver le reste des coordonnées x_{col} et y_{col} :

$$p_{col} = p_a + t \vec{u} \quad \text{avec} \quad t \in \mathbb{R} \quad (3.6a)$$

$$t = \frac{z_{col} - z_a}{u_z} \quad (3.6b)$$

$$x_{col} = x_a + t u_x \quad (3.6c)$$

$$y_{col} = y_a + t u_y \quad (3.6d)$$

Dans le troisième cas de figure le photon traverse l'atmosphère horizontalement i.e. $u_z = 0$. Cela veut dire que l'altitude et l'épaisseur optique verticale du photon du point initial jusqu'au point de collision ne change pas, i.e. $z_{col} = z_a$ et $\tau_{col} = \tau_a$. Le photon ne changera également pas de couche. Pour retrouver le dernier inconnu p_{col} , il suffit de résoudre les équations linéaires ci-dessous :

$$d_{ob_col} = \frac{\Delta z_i \cdot \tau_{ob_col}}{\Delta \tau_i} \quad (3.7a)$$

$$x_{col} = x_a + u_x \cdot d_{ob_col} \quad (3.7b)$$

$$y_{col} = y_a + u_y \cdot d_{ob_col} \quad (3.7c)$$

Finalement, pour déterminer s'il y a diffusion avec un composant atmosphérique ou intersection avec un objet 3D, il suffit de comparer les épaisseurs op-

tiques obliques parcourus jusqu'à collision et jusqu'à intersection τ_{ob_col} et τ_{ob_int} . Si $\tau_{ob_col} < \tau_{ob_int}$ alors il y a diffusion du photon avant qu'il ne puisse atteindre l'objet 3D et inversement si $\tau_{ob_col} > \tau_{ob_int}$.

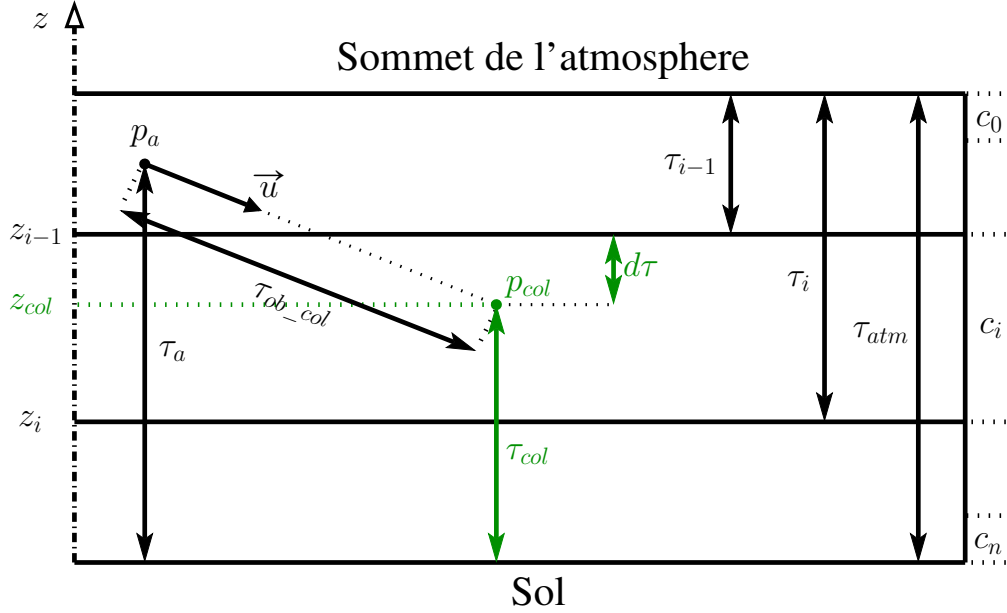


FIGURE 3.2 – Chemin parcouru par un photon, dans la direction $\vec{u}$, démarrant du point p_a jusqu'à sa collision avec un composant atmosphérique situé à l'intérieur de la couche c_i . Définitions similaires pour les paramètres communs avec la figure 3.1. En vert, les grandeurs à calculer.

3.2.3 Validation

Afin de vérifier l'implémentation de la prise en compte d'objets 3D dans le code SMART-G, des tests simples ont été réalisés, pour une atmosphère standard AFGL-TR [81] avec un sol supposé 100% absorbant. Les photons sont lancés à TOA (120 km d'altitude) depuis une source supposée ponctuelle avec un angle d'incidence zénithal et azimutal respectivement de 30 et 0 degrés. Comme illustré sur la figure 3.3, les photons sont lancés en direction du sol vers l'origine du repère ($x=0, y=0, z=0$).

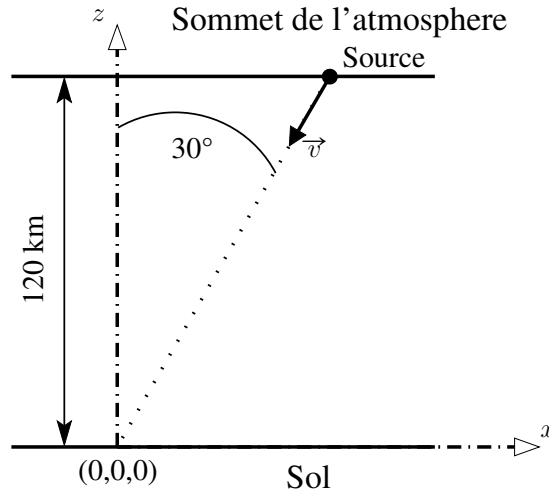


FIGURE 3.3 – Description des paramètres initiaux de simulation. Les photons sont lancés depuis la source vers le sol en direction de l'origine du repère.

Le calcul de la réflectance [voir équation (2.12)] sortante en TOA est un excellent moyen pour observer l'effet de la diffusion atmosphérique. Avant l'insertion d'un objet 3D dans l'atmosphère, un cas de référence est calculé, c'est-à-dire la réflectance sortante en TOA à 550 nm calculée à partir d'une atmosphère (AFGL-TR) sans y avoir incorporé d'objets, avec un sol totalement absorbant. Les résultats sont présentés sur la figure 3.4 . Comme attendu, on observe des réflectances qui augmentent avec l'angle zénithal d'observation, la quantité d'atmosphère traversée et donc de diffusion augmentant. La dissymétrie observée est liée à la fonction de phase qui est minimum pour des angles de diffusion latéraux.

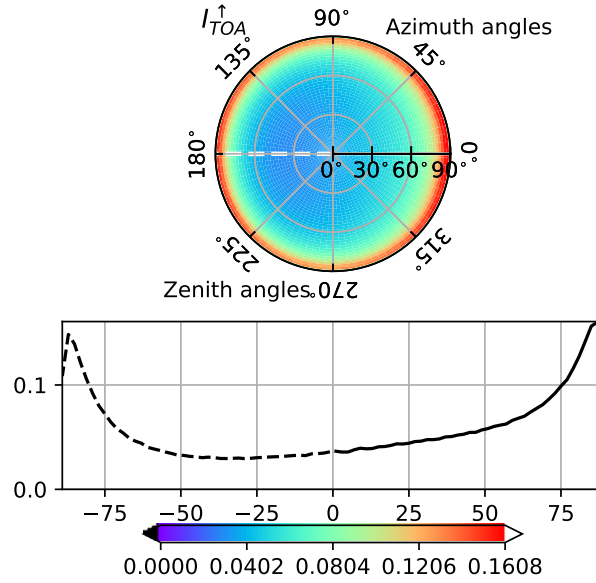


FIGURE 3.4 – Réflectances sortantes à 550 nm à TOA pour le cas de référence (sans objet 3D). Représentation en coordonnées polaires des réflectances en fonction de l'angle zénithal et de l'angle azimutal (en haut), et représentation graphique en fonction de l'angle zénithal dans le plan d'incidence solaire (en bas).

Pour les tests présentés plus bas, un objet carré/rectangulaire (maillage de deux triangles) est introduit dans l'atmosphère. L'objet introduit est toujours paramétré comme étant purement absorbant pour bloquer une partie des photons diffusés avant qu'ils n'atteignent le sommet de l'atmosphère, ce qui permet de vérifier l'effet de l'intersection du rayonnement par l'objet sur la réflectance sortante en TOA. Tout au long de cette section, le terme "signal" sera souvent utilisé pour faire référence à la réflectance sortante à TOA.

Test 1 : Pour ce premier test, un objet rectangulaire de 30 km x 20 km a été placé parallèlement au plan zy à une distance de 12 km suivant l'axe des x. La figure 3.5 offre une vue 2D et 3D de ce premier cas test. La figure 3.6 à gauche montre les résultats de la simulation avec l'objet rectangulaire qui sont à comparer avec le cas de référence tracé à droite. Comme pour la figure 3.4, les représentations polaires et selon le plan d'incidence solaire sont tracés. Le signal en TOA de ce premier cas

test est nettement atténué par rapport au cas de référence. La probabilité qu'un photon subisse une diffusion augmente au fur et à mesure qu'il s'approche du sol suivant une loi exponentielle (nombre de molécules qui augmente). Comme l'objet absorbant atteint une altitude de 30 km sur les 120 km de l'atmosphère, il stoppe le rayonnement avant qu'il n'atteigne les premières couches atmosphérique qui détiennent une quantité suffisante de molécules/particules pour une probabilité de diffusion non négligeable. Il n'est donc pas surprenant d'avoir une bonne partie du signal absorbée. Comme précédemment, une dissymétrie des réflectances liés à la fonction de phase est visible. Elle est accentuée par le fait que les photons diffusés vers l'avant entre 30 km d'altitude et l'obstacle sont bloqués par celui-ci (figure 3.5).

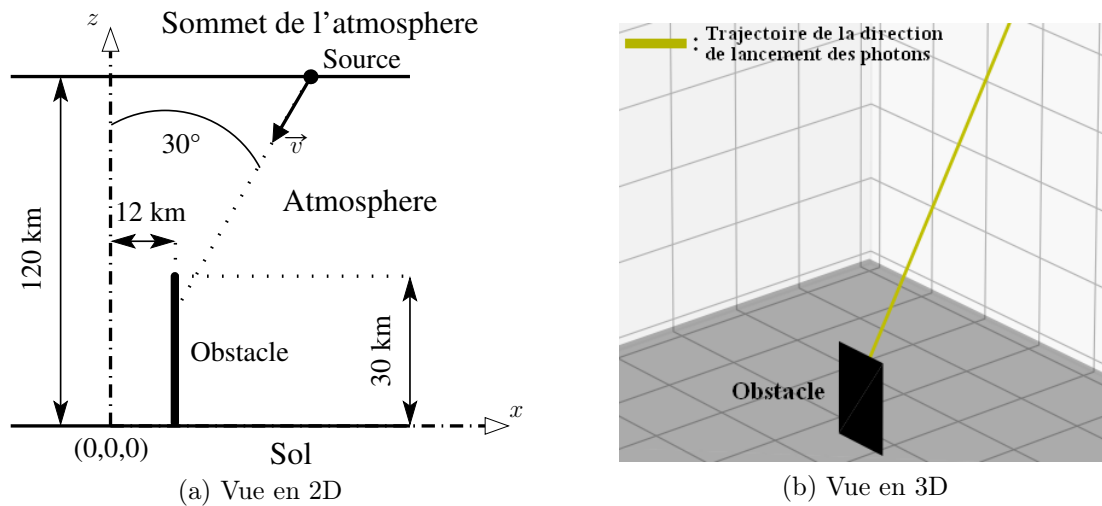


FIGURE 3.5 – Description des paramètres de simulation pour le cas test 1. Les photons sont lancés depuis une source à TOA et se dirigent vers le sol en direction du point d'origine. Un objet rectangulaire de 30 km x 20 km sert d'obstacle à une partie des photons diffusés.

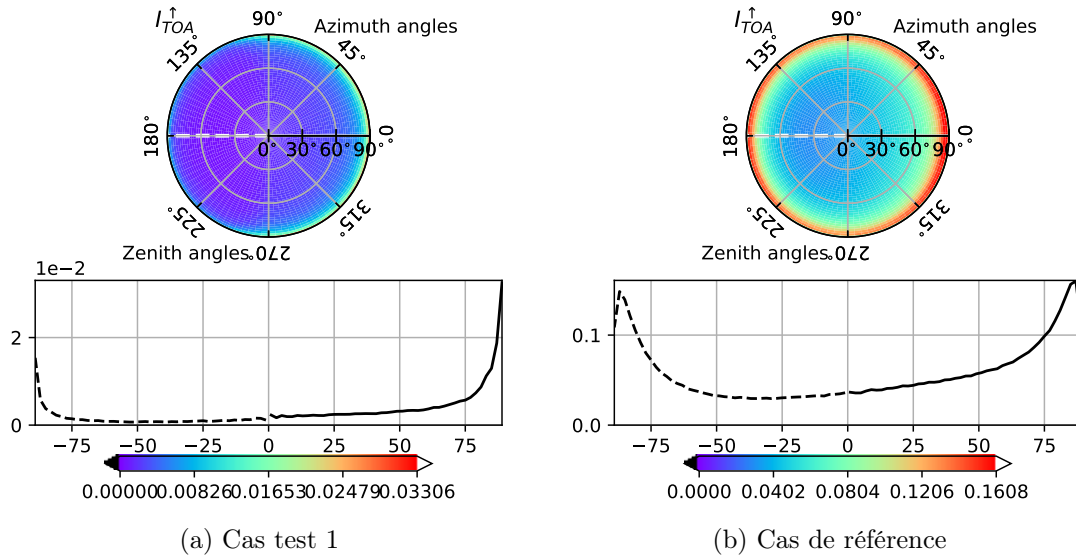


FIGURE 3.6 – Description identique à la figure 3.4 ; avec à droite le cas de référence, et à gauche le cas avec un obstacle de 30 km x 20 km introduit dans l’atmosphère.

Test 2 : Le second test reprend le cas test 1 en diminuant la taille de l’objet qui sert d’obstacle. L’objet absorbant est maintenant un carré de 20 km x 20 km, laissant ainsi le rayonnement direct atteindre le sol (voir la figure 3.7). La figure 3.8 montre un signal similaire par rapport au cas de référence pour les angles zénithaux négatifs. Pour les angles zénithaux positifs, il peut être remarqué que la majorité des photons correspondant à des angles zénithaux au-dessus des 30 degrés sont absorbée par l’objet. Le signal restant pour des angles supérieurs à 30° est lié à la diffusion arrière au-dessus de 20 km d’altitude.

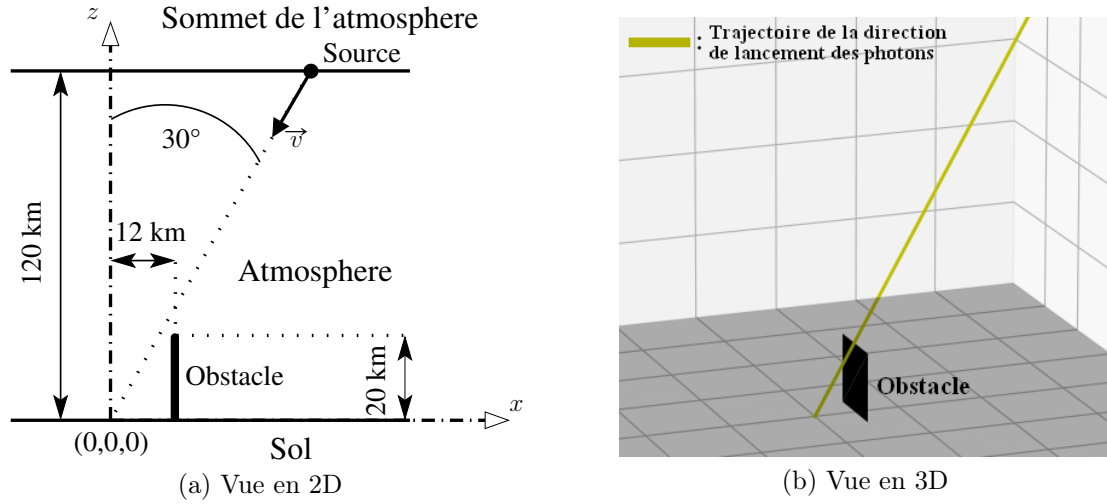


FIGURE 3.7 – Identique à la figure 3.5 mais pour le cas test 2, avec un obstacle carré de 20 km x 20 km

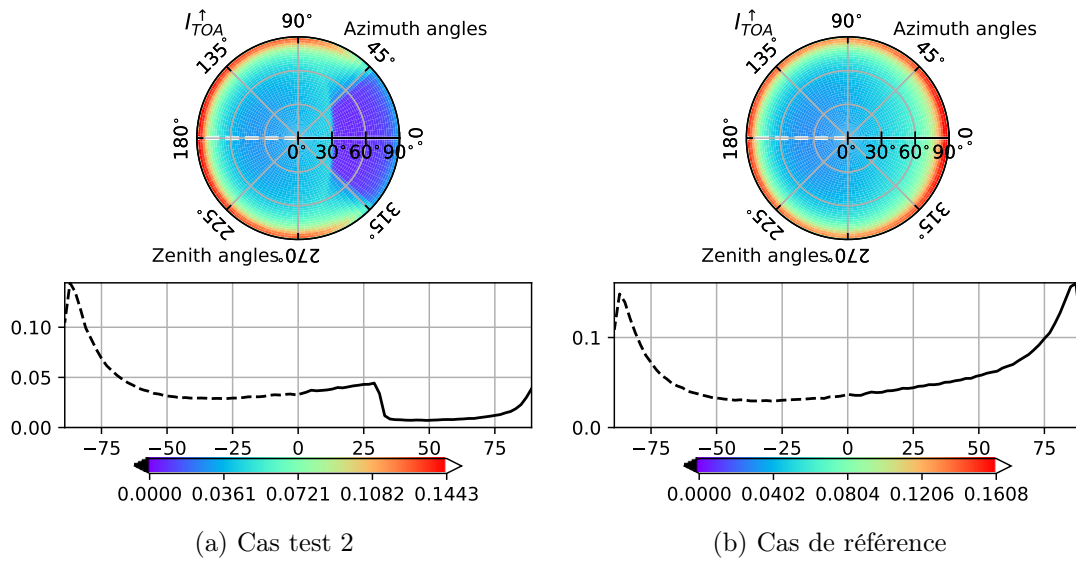


FIGURE 3.8 – Description identique à la figure 3.6 ; avec à droite le cas de référence, et à gauche le cas avec un obstacle de 20 km x 20 km introduit dans l'atmosphère.

Test 3 : Pour ce troisième test, un objet rectangulaire de 120 km x 20 km est placé toujours dans le plan zy mais à une distance de 70 km suivant l'axe des x (voir la figure 3.9).

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

L'objectif est de vérifier que l'obstacle bloque bien tous les photons subissant une rétrodiffusion dans le plan d'incidence solaire, sachant que l'objet est placé du sol jusqu'au sommet de l'atmosphère, juste derrière la source de lancement des photons. Sur la figure 3.10, le signal (avec un azimuth de 0 degrés) est presque totalement absorbé pour les angles zénithaux au-dessus des 30 degrés. Le léger signal observé au delà de 60° peut être due à la diffusion multiple. Cette hypothèse a été confirmée en réalisant le même test avec un carré de 120 km x 120 km. Dans cette configuration, le signal devient en effet quasiment inexistant pour les angles zénithaux supérieur à 30 degrés.

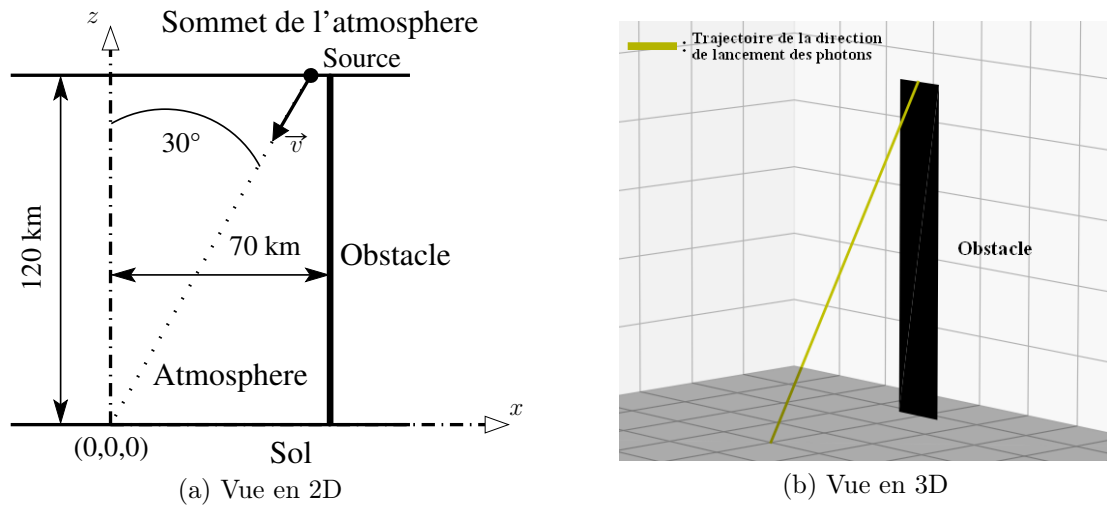


FIGURE 3.9 – Identique à la figure 3.5 mais pour le cas test 2, avec un obstacle rectangulaire de 120 km x 20 km

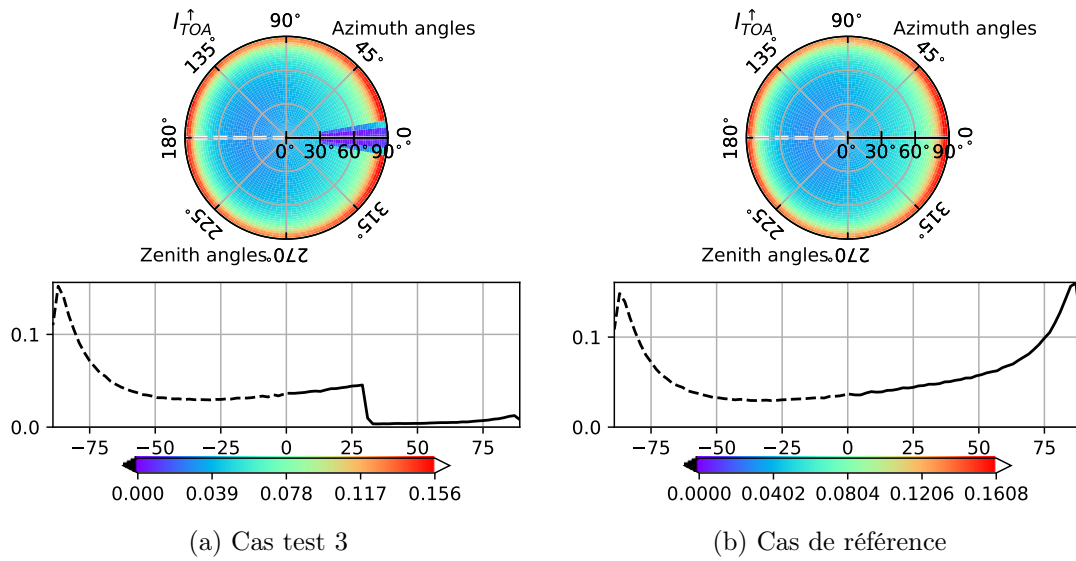


FIGURE 3.10 – Description identique à la figure 3.6 ; avec à droite le cas de référence, et à gauche le cas avec un obstacle de 120 km x 20 km introduit dans l’atmosphère.

Ces quelques tests à partir d’une source ponctuelle ont permis de valider l’implémentation des objets 3D dans le code de transfert radiatif atmosphérique SMART-G.

Dans la suite, l’implémentation d’une source étendue est décrite en utilisant deux modes de lancement (direct et inverse).

3.3 Le lancement des photons pour considérer les multiples contributions atmosphériques

L'objectif de cette thèse concerne l'amélioration de l'estimation du flux collecté par une CST notamment grâce à la prise en compte des différentes contributions au flux collecté. Certaines sont illustrées sur la figure 3.11 avec des photons réfléchis par seulement les héliostats, d'autres interagissant avec l'atmosphère avant ou après et d'autres réfléchis par la surface ou rediffusés par l'atmosphère.

Dans la version initiale de SMART-G, les modes standards de lancement des photons ne permettent pas d'estimer le flux collecté et sa distribution à la surface du récepteur. En effet, le mode "forward standard", lance les photons depuis TOA dans la direction du rayonnement solaire (source solaire ponctuelle), ce qui permet par exemple le calcul du DNI strict (voir chapitre 1 section 1.3.3) mais ne permet pas la simulation du rayonnement solaire incident sur tout le champ d'héliostats. Le mode "backward standard", lance les photons suivant une direction échantillonnée à l'intérieur d'un angle solide prédéfini depuis un capteur ponctuelle jusqu'à TOA (principe de retour inverse de la lumière), ce qui ne permet pas non plus la simulation du flux obtenu depuis tout le champ d'héliostats.

Pour considérer les contributions de tous les photons atteignant le récepteur (photons réfléchis par le champ d'héliostats, photons diffusés, etc.), deux nouveaux modes de lancement des photons ont été implémentés :

Le mode de lancement A (suivi en forward) où les photons sont lancés selon la direction du rayonnement solaire (ou optionnellement selon une direction échantillonnée à l'intérieur de l'angle solide solaire) depuis une surface étendue située à TOA. Une partie des photons après diffusion et réflexion atteindra le récepteur.

Le mode de lancement B (suivi en backward) utilise le principe de retour inverse de la lumière. Les photons sont lancés depuis la surface du récepteur dans toutes les directions de l'espace et parcourent le chemin inverse (par rapport au chemin réaliste soleil-récepteur) jusqu'à TOA. Ici, le mode backward, sur

le code SMART-G [16], doit être activé pour une correcte résolution des équations de transfert radiatif polarisées.

Le mode de lancement A est le plus logique et a été celui développé initialement. Le mode de lancement B a ensuite été développé pour des raisons d'optimisation du temps de calcul (20 fois plus rapide que le mode A pour certaines simulations). Le mode de lancement A est néanmoins nécessaire 1) pour obtenir la décomposition de l'efficacité optique que nous verrons dans le chapitre 4, et 2) pour valider la modélisation géométrique d'une véritable CST (notamment via les comparaisons des efficacités d'ombrage, de blocage et de débordement, voir section 4.3).

Dans la suite de cette section, les deux modes de lancement des photons sont présentés avec les détails des équations permettant d'estimer le flux collecté par le récepteur et la distribution à sa surface.

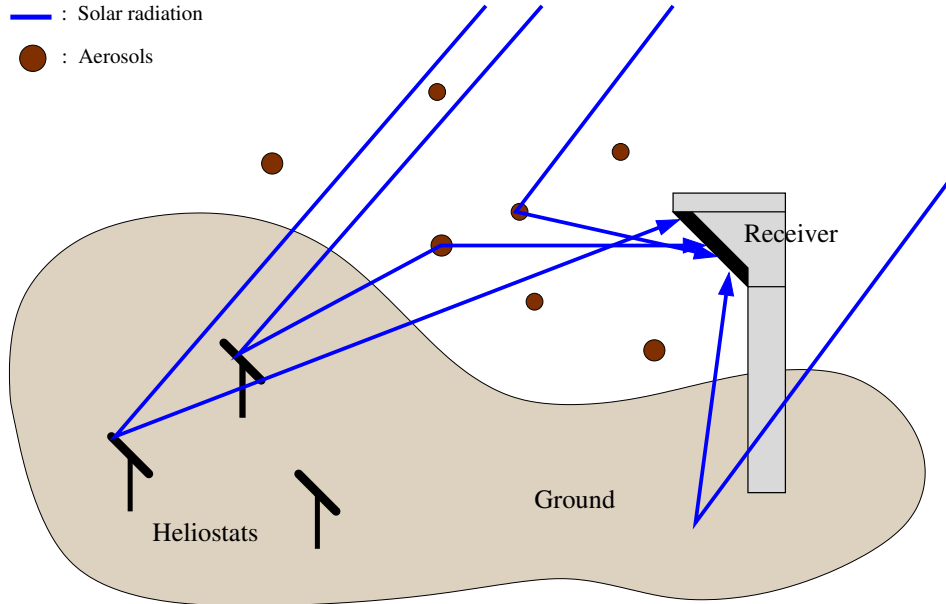


FIGURE 3.11 – Représentation d'une partie des chemins optiques que peut possiblement emprunter un photon avant son arrivée sur le récepteur d'une CST.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

3.3.1 Le mode de lancement A : suivi en "forward"

Le mode de lancement A consiste à lancer les photons depuis une surface suffisamment étendue située au sommet de l'atmosphère. L'augmentation de la surface de lancement améliore la prise en compte des différentes contributions possibles sur le flux collecté par la CST et tend vers une limite. Pour illustration, une surface de 45 km x 45 km est suffisante pour des photons lancés en condition de ciel clair avec un angle zénithal de 14.3° [82] (voir annexe A l'asymptote de la figure A.3), et cette surface augmente selon l'angle zénithal. Au sommet de l'atmosphère, la surface de lancement est positionnée de sorte que les photons, entrant dans la direction du rayonnement solaire, visent le domaine où se situe la centrale. Les photons parcourent l'atmosphère et peuvent durant leur parcours subir une diffusion par un composant atmosphérique, mais aussi une réflexion par un héliostat ou par le sol. Pour finir, il y a addition du poids de chaque photon (pour la considération de l'absorption) atteignant la surface du récepteur en provenance de toutes les directions de l'espace. La prise en compte de la diffusion, la réflexion par le sol et la réflexion par les héliostats est donc réalisée.

Ce mode A contient deux options qui consiste à considérer ou non l'angle solide solaire. La non prise en compte de l'angle solide solaire présente l'avantage d'une diminution du temps de calcul pour les angles zénithaux élevés (notamment à partir de 60°), mais entraîne une estimation moins réaliste de la distribution spatiale du flux à la surface du récepteur, ce qui peut, moins significativement, influencer l'estimation du flux collecté. Les deux options sont présentées car elles comportent des avantages et des inconvénients. L'option sans considération de l'angle solide solaire (mode A₁) permet de plus de commencer par un cas simple, pour ensuite présenter plus facilement l'ajout de l'angle solide solaire (mode A₂).

L'objectif des modes de lancement A et B est, pour rappel, l'estimation du flux collecté par une CST (Φ_r) avec sa distribution à la surface du récepteur.

Sans prise en compte de l'angle solide solaire (A₁) : tous les photons sont uniformément répartis sur la surface de lancement S_{toa} dans la direction du

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

rayonnement solaire $\vec{u}_s$.

A partir de la figure 3.12, le flux radiatif solaire descendant à TOA Φ_{toa} peut être écrit ainsi :

$$\Phi_{toa} = E_{toa} |\vec{u}_s \cdot \vec{n}_{toa}| \int_{S_{toa}} dS \quad (3.8)$$

où Φ_{toa} représente le flux à TOA à la surface de lancement S_{toa} , $\vec{n}_{toa}$ la normale par rapport au plan de la surface à TOA, et E_{toa} l'irradiance du soleil normale au rayonnement solaire à TOA. Cela permet d'obtenir pour la surface de lancement, la formulation intégrale, utile pour le calcul Monte-Carlo, suivante :

$$\Phi_{toa} = \frac{E_{toa} |\vec{u}_s \cdot \vec{n}_{toa}|}{p_{R_1}(r_1)} \int_{\mathcal{D}_{S_{toa}}} p_{R_1}(r_1) dr_1 \quad (3.9)$$

où r_1 est la valeur de la position initiale du photon tirée aléatoirement sur la surface de lancement S_{toa} , suivant la fonction densité de probabilité (abrégée PDF) ci-dessous :

$$p_{R_1}(r_1) = \frac{1}{S_{toa}} \quad (3.10)$$

La formulation intégrale du flux collecté est volontairement omis (de même pour le mode A₂ et B), toutes les possibilités du code SMART-G avec la prise en compte de l'absorption, de la diffusion (plusieurs types de nuages, gaz et aérosols) et de la réflexion (par exemple le sol lambertien) font qu'une telle formulation (sans compter la considération de la rugosité des héliostats introduite dans le chapitre 4) sera trop longue et complexe à écrire.

Pour rappel, dans SMART-G un poids (initialisé à 1) est assigné à chaque photon pour considérer l'absorption. Le flux collecté par le récepteur d'une CST se fait par sommation des photons en provenance de toutes les directions atteignant sa surface. Ainsi l'estimation du flux collecté s'écrit :

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

$$\Phi_r \simeq \overline{\Phi_r} = \frac{1}{N_{ph}} \sum_{i=1}^{N_{ph}} \hat{w}_{0,i} \quad (3.11)$$

avec $\overline{\Phi_r}$ la moyenne empirique (estimation par Monte-Carlo) du flux collecté par le récepteur ; N_{ph} le nombre total de photons lancés à TOA ; et $\hat{w}_{0,i}$ une fonction (inspirée de la fonction poids introduite par Jérémie De la Torre [83], également utilisée par Oliver Farges pour l'estimation du flux collecté par une CST [84, 85]) défini comme suit :

$$\hat{w}_{0,i} = \begin{cases} E_{toa} |\vec{u}_s \cdot \vec{n}_{toa}| S_{toa} w_i & \text{if } r_{2,i} \in \mathcal{D}_{S_r} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

où w_i représente le poids du photon i , $r_{2,i}$ sa position finale et $\mathcal{D}_{S_r}$ le domaine de définition de la surface du récepteur. L'écart-type du flux collecté $\sigma[\Phi_r]$ est estimé selon l'équation suivante [voir équation (2.47) du chapitre 2] :

$$\sigma[\Phi_r] \simeq \sigma_{ech}[\Phi_r] = \frac{1}{\sqrt{N_{ph}}} \sqrt{\frac{N_{ph}}{N_{ph} - 1} \left(\overline{\Phi_r^2} - \overline{\Phi_r}^2 \right)} \quad (3.13)$$

avec $\sigma_{ech}[\Phi_r]$ l'erreur standard, qui est l'estimation par Monte-Carlo de l'écart-type du flux collecté par le récepteur.

La surface du récepteur est divisée en plusieurs cellules rectangulaires où les sommes de poids de photons sont stockées. Une estimation du flux Monte-Carlo dans chaque cellule est ainsi obtenue et permet d'avoir la distribution spatiale 2D du flux collecté à la surface du récepteur. Enfin, pour obtenir l'irradiance, il suffit de diviser le flux collecté par la surface du récepteur (ou par une cellule pour la distribution de l'irradiance).

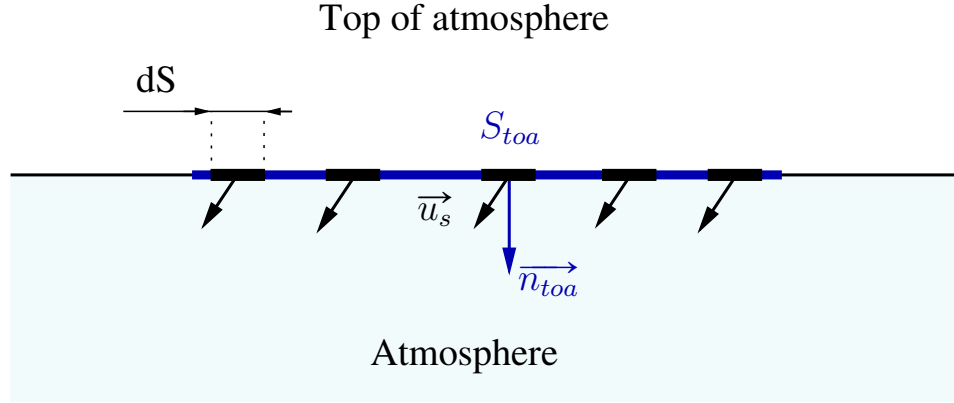


FIGURE 3.12 – Représentation schématique des photons, ayant pour surface élémentaire dS , distribués sur la surface de lancement S_{toa} (en bleu) de normale $\vec{n}_{toa}$, dans la direction du rayonnement solaire $\vec{u}_s$.

En tenant compte de l'angle solide solaire (A_2) : Comme précédemment, tous les photons sont lancés uniformément à TOA sur la surface S_{toa} . Pour prendre en considération l'angle solide solaire Ω_s , la direction initiale de chaque photon est échantillonnée à l'intérieur du cône d'angle solide Ω_s .

Les paramètres en commun entre les figures 3.12 et 3.13 partagent les mêmes définitions. Sur la figure 3.13, Ω_s , δ_s et $\vec{\omega}_s$ représentent respectivement l'angle solide solaire, le rayon angulaire solaire et la direction échantillonnée à l'intérieur de l'angle solide solaire. Suivant le même raisonnement que précédemment, il peut être déduit de la figure 3.13 l'équation suivante :

$$\Phi_{toa} = L_s \int_{S_{toa}} dS \int_{\Omega_s} |\vec{\omega}_s \cdot \vec{n}_{toa}| d\vec{\omega}_s \quad (3.14)$$

avec L_s la luminance solaire :

$$L_s = \frac{E_{toa}}{\int_{\Omega_s} d\omega} = \frac{E_{toa}}{2\pi (1 - \cos\delta_s)} \quad (3.15)$$

La formulation intégrale de Monte-carlo pour estimer le flux collecté par le récepteur est déduite en utilisant l'équation (3.14) :

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

$$\Phi_{toa} = E_{toa} |\vec{\omega}_s \cdot \vec{n}_{toa}| S_{toa} \int_{\mathcal{D}_{S_{toa}}} p_{R_1}(r_1) dr_1 \int_{\mathcal{D}_{\Omega_s}} p_{\Omega_s}(\vec{\omega}_s) d\vec{\omega}_s \quad (3.16)$$

où $\mathcal{D}_{S_{toa}}$ et $\mathcal{D}_{\Omega_s}$ représentent respectivement les domaines de définition de la surface de lancement et de l'angle solide solaire; r_1 et $\vec{\omega}_s$ sont respectivement les valeurs de la position et la direction initiales du photon, tirées aléatoirement suivant les PDF ci-dessous :

$$p_{R_1}(r_1) = \frac{1}{S_{toa}} \quad (3.17)$$

$$p_{\Omega_s}(\vec{\omega}_s) = \frac{1}{\int_{\Omega_s} d\omega} = \frac{1}{2\pi (1 - \cos\delta_s)} \quad (3.18)$$

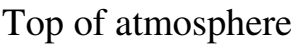
En suivant la même méthodologie que pour l'équation 3.11, le flux collecté par le récepteur est estimé comme suit :

$$\Phi_r \simeq \overline{\Phi_r} = \frac{1}{N_{ph}} \sum_{i=1}^{N_{ph}} \hat{w}_{1,i} \quad (3.19)$$

avec la fonction $\hat{w}_{1,i}$ défini comme suit :

$$\hat{w}_{1,i} = \begin{cases} E_{toa} |\vec{\omega}_s \cdot \vec{n}_{toa}| S_{toa} w_i & \text{if } r_{2,i} \in \mathcal{D}_{S_r} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3.20)$$

Pour finir, l'erreur standard, la distribution du flux collecté ainsi que l'irradiance se déduisent comme précédemment décrit avec le mode A qui ne tient pas compte de l'angle solide solaire.



δ_s représente le rayon angulaire solaire.

3.3.2 Le mode de lancement B : suivi en "backward"

Sur la figure 3.14, les paramètres non encore utilisés, sont définis comme suit : $\vec{w_e}$ la direction du photon à la fin de son parcours ; $\vec{n_r}$ le vecteur normal à la surface du récepteur ; δ_s le rayon angulaire solaire ; et $\vec{u_{s-}}$ la direction inverse du soleil (localisée au centre de Ω_{s-}). De la même manière qu’avec le mode de lancement A, la formulation intégrale pour le calcul Monte-Carlo du flux TOA est :

$$\Phi_{toa} = \frac{L_s |\vec{\omega}_r \cdot \vec{n}_r|}{p_{R_1}(r_1) p_{\Omega_r}(\vec{\omega}_r)} \int_{\mathcal{D}_{S_r}} p_{R_1}(r_1) dr_1 \int_{\mathcal{D}_{\Omega_r}} p_{\Omega_r}(\vec{\omega}_r) d\vec{\omega}_r \quad (3.21)$$

où r_1 représente la valeur de la position initiale du photon tirée aléatoirement

à la surface du récepteur suivant la PDF p_{R_1} et $\vec{\omega}_r$ la valeur de la direction initiale d'un photon tirée aléatoirement suivant une loi lambertienne (comme [40] avec un sol lambertien) à l'intérieur de Ω_r , également appelé "cosine-weighted sampling" [77] suivant la PDF p_{Ω_r} :

$$p_{R_1}(r_1) = \frac{1}{S_r} \quad (3.22)$$

$$p_{\Omega_r}(\vec{\omega}_r) = \frac{|\vec{\omega}_r \cdot \vec{n}_r|}{\pi} \quad (3.23)$$

La formulation intégrale de l'équation (3.21) correspond au flux des photons à TOA, en provenance de toutes les directions, qui atteint la surface du récepteur. Pour estimer le flux collecté par le récepteur dans la direction du rayonnement solaire, il faut comptabiliser uniquement les poids des photons sortant à TOA à l'intérieur de l'angle solide solaire inverse de la direction souhaitée. Cela donne l'estimation de Monte-Carlo du flux collecté Φ_r suivante :

$$\Phi_r \simeq \overline{\Phi_r} = \frac{1}{N_{ph}} \sum_{i=1}^{N_{ph}} \hat{w}_{2,i} \quad (3.24)$$

avec la fonction $\hat{w}_{2,i}$ défini comme suit :

$$\hat{w}_{2,i} = \begin{cases} \frac{E_{toa} S_r w_i}{2(1-\cos\delta_s)} & \text{if } r_{2,i} \in \mathcal{D}_{toa} \text{ and } |\vec{\omega}_e \cdot \vec{u}_s| \geq \cos\delta_s \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3.25)$$

où $r_{2,i}$ représente la position finale du photon i et $\mathcal{D}_{toa}$ le domaine correspondant à tout l'espace au delà du sommet de l'atmosphère. L'erreur standard, la distribution du flux collecté et l'irradiance sont calculées de la même façon que décrit pour le mode A.

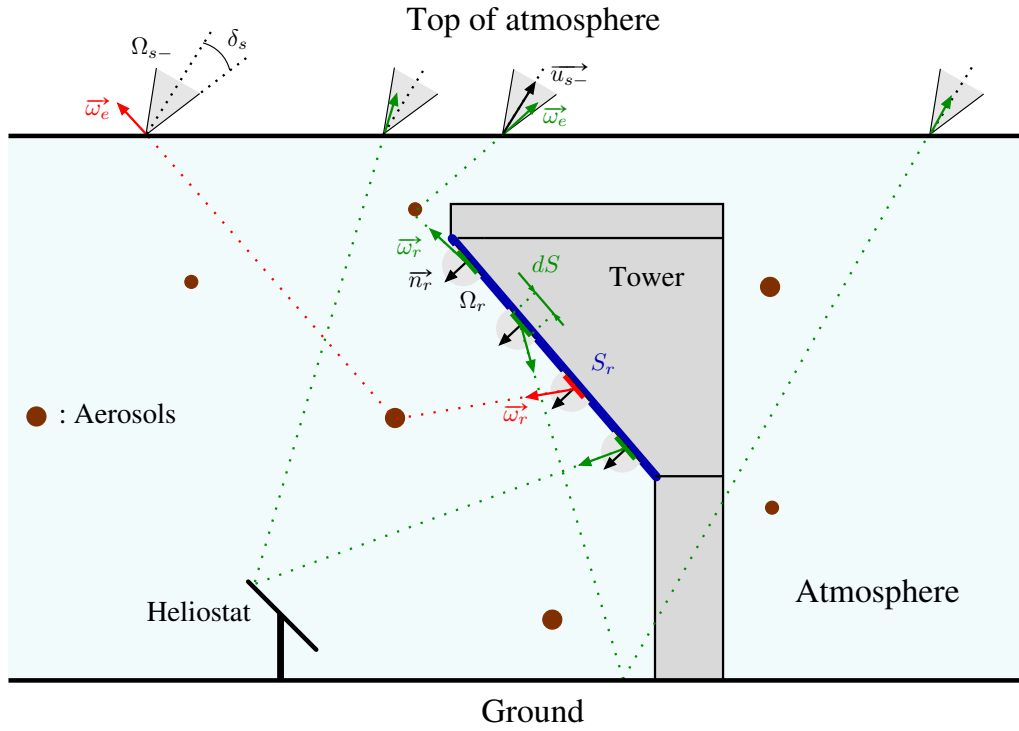


FIGURE 3.14 – Représentation schématique du lancement des photons avec le mode de lancement B. Une fois arrivés à TOA, les photons se retrouvent dans une direction comprise à l'intérieur de l'angle solide solaire inverse Ω_{s-} (en vert) ou à l'extérieur (en rouge).

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la méthode développée pour permettre aux codes de transfert radiatif atmosphérique Monte-Carlo d'estimer directement le flux collecté par une CST a été présentée.

Dans un premier temps, les techniques nécessaires pour considérer des objets 3D dans une atmosphère réaliste (absorbante et diffusante) ont été présentés dans le cas d'une atmosphère plan-parallèle. Plusieurs tests ont été réalisés et exposés et permettent de valider la prise en compte des objets 3D dans l'atmosphère réaliste. Dans un deuxième temps, deux nouveaux modes de lancement des photons ont été développés pour considérer les multiples contributions atmosphériques possibles sur le flux collecté : le mode de lancement A (suivi en forward) consistant à lancer les photons dans l'atmosphère depuis une surface étendue à TOA, pour sommer ceux arrivant sur la surface du récepteur. Le mode de lancement B (suivi en backward) consiste à lancer les photons depuis la surface du récepteur dans toutes les directions du demi-espace, avec une sommation des photons sortants à TOA dans une direction comprise dans l'angle solide solaire inverse.

Les deux modes de lancement seront utilisés dans le chapitre suivant pour l'estimation de l'efficacité optique d'une CST. Ces deux modes seront complémentaires, par exemple le mode A permettra de décomposer l'efficacité optique, là où le mode B ne le permet pas. Le mode B est lui beaucoup moins gourmand en temps de calcul (en prenant en compte l'atmosphère). Le chapitre suivant présente également des comparaisons avec d'autres résultats effectués sans atmosphère (actuellement seulement SMART-G permet d'estimer le flux collecté par une CST d'une atmosphère réaliste). Ces comparaisons sont utiles pour valider la modélisation des objets 3D (à travers la modélisation d'une véritable CST) et des modes de lancement A et B.

Chapitre 4

Calcul de l'efficacité optique d'une centrale solaire à tour avec le code SMART-G

Ce chapitre présente la méthode mise en place pour l'estimation de l'efficacité optique, d'une Centrale Solaire à Tour (CST), avec les modes de lancement A et B du code SMART-G exposés dans le chapitre précédent. Le chapitre est divisé en trois parties. La première partie donne les définitions de l'efficacité optique et ses six composantes et expose les méthodes permettant leurs estimations. Un exemple explique comment gérer les six composantes afin de les estimer correctement. Dans la deuxième partie, les équations permettant de déterminer l'efficacité optique dans SMART-G avec les modes A et B sont présentées. La troisième partie termine le chapitre avec des comparaisons basées sur la centrale PS10. Une comparaison de l'estimation annuelle de l'efficacité optique et de certaines de ses composantes est effectuée avec des résultats publiés. Une comparaison est aussi effectuée entre le code SMART-G et le code de ray tracing Solstice incluant l'efficacité optique et de certaines de ses composantes, mais aussi les cartes de flux à la surface du récepteur de la CST.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Sommaire

4.1	L'efficacité optique et ses six composantes	85
4.1.1	Définition	85
4.1.2	Méthodes d'estimation existantes	89
4.1.3	Importance de l'ordre et du poids	90
4.2	Méthode d'estimation avec SMART-G	93
4.2.1	L'efficacité optique avec les modes A et B	93
4.2.2	Décomposition de l'efficacité optique avec le mode A	95
4.3	Résultats avec SMART-G sans atmosphère	100
4.3.1	Application à la centrale PS10	100
4.3.2	Comparaison avec des résultats annuels publiés	103
4.3.3	Validation avec le code de ray tracing Solstice	105
4.4	Conclusion	113

4.1 L'efficacité optique et ses six composantes

4.1.1 Définition

Pour des raisons de simplification, le flux provenant du rayonnement solaire direct est tout au long du chapitre abrégé par "flux direct".

L'efficacité optique d'une Centrale Solaire à Tour (CST) indique le taux d'efficacité du champ d'héliostats à recevoir et à renvoyer le rayonnement solaire direct sur le récepteur. L'efficacité optique η_{opt} (avec $0 \leq \eta_{opt} \leq 1$, où 0 exprime une efficacité nulle et 1 une efficacité parfaite) est définie comme le rapport entre le flux direct collecté par le récepteur de la centrale et le flux direct pouvant atteindre le champ d'héliostats, ce qui donne à l'instant t :

$$\eta_{opt}(t) = \frac{\Phi_{field}(t)}{A_{field} DNI(t)} \quad (4.1)$$

où Φ_{field} est le flux collecté par le récepteur provenant du rayonnement solaire direct réfléchi par le champ d'héliostats, abrégé par "flux direct collecté". A_{field} représente l'aire totale du champ d'héliostats et DNI l'irradiance directe normale.

Le flux direct incident puis réfléchi par le champ d'héliostats peut subir jusqu'à six types de pertes optiques : l'ombrage, la perte par effet cosinus, la perte liée à la réflectivité, le blocage, la perte par atténuation atmosphérique et la perte de débordement (comme illustré sur la figure 4.1). Ainsi, l'efficacité optique d'une CST, notée η_{opt} , peut être décomposée en six termes d'efficacités optiques spécifiques :

$$\eta_{opt}(t) = \eta_{cos}(t) \eta_{omb}(t) \eta_{ref}(t) \eta_{blo}(t) \eta_{deb}(t) \eta_{atm}(t) \quad (4.2)$$

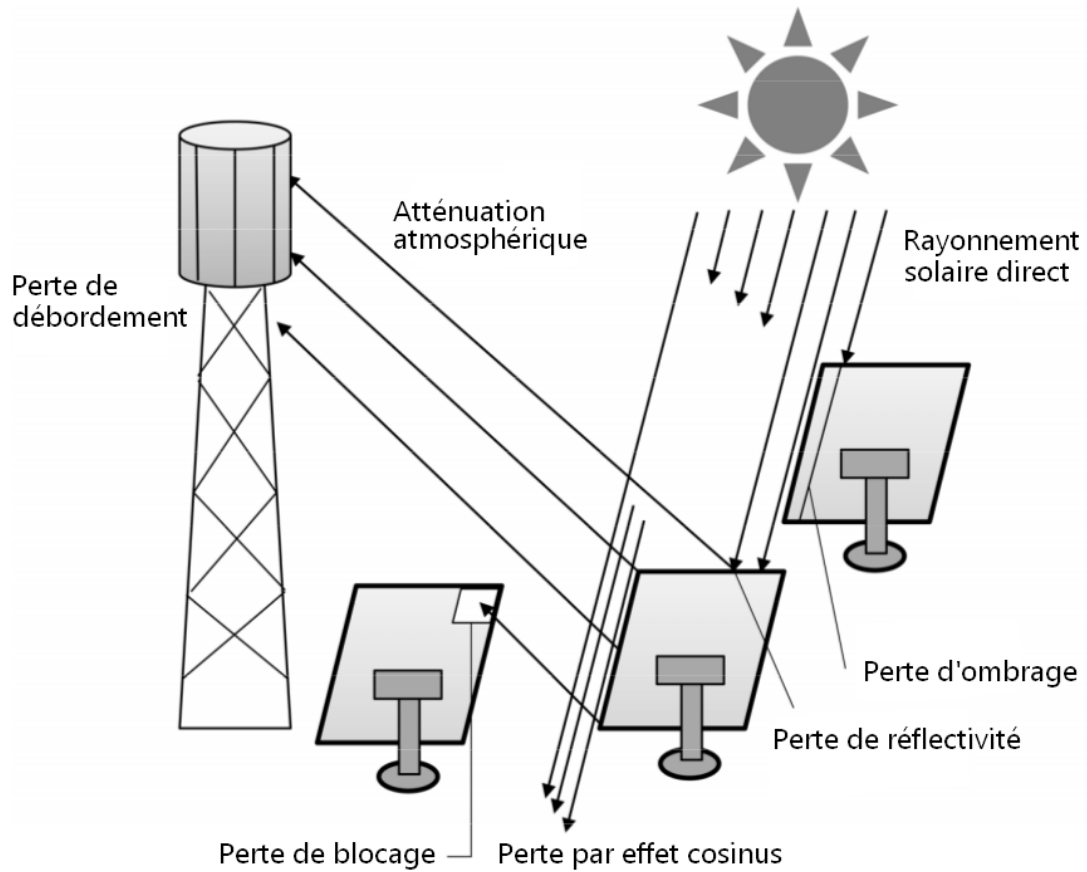


FIGURE 4.1 – Représentation schématique des six types de pertes optiques dans une centrale solaire à tour [22].

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Les six composantes de l'efficacité optique (à ne pas confondre avec les pertes optiques, qui représentent une quantité d'énergie perdue en watt) sont définies comme suit :

1. **L'efficacité cosinus** : Pour un héliostat donné, l'angle θ entre la direction du rayonnement solaire direct incident et la normale à la surface de l'héliostat entraîne une réduction du flux solaire potentiellement recevable par l'héliostat. L'efficacité η_{cos} liée à l'effet cosinus vaut le cosinus de l'angle θ . La figure 4.2 illustre ce phénomène, avec deux héliostats H_1 et H_2 de surface A_h et de normale N_h ; la surface A_c décrit la surface projetée d'un l'héliostat, perpendiculaire au rayonnement solaire direct incident ; l'effet cosinus est apparent sur l'héliostat H_2 , où est visible la réduction du flux incident du fait de l'inclinaison d'angle θ .

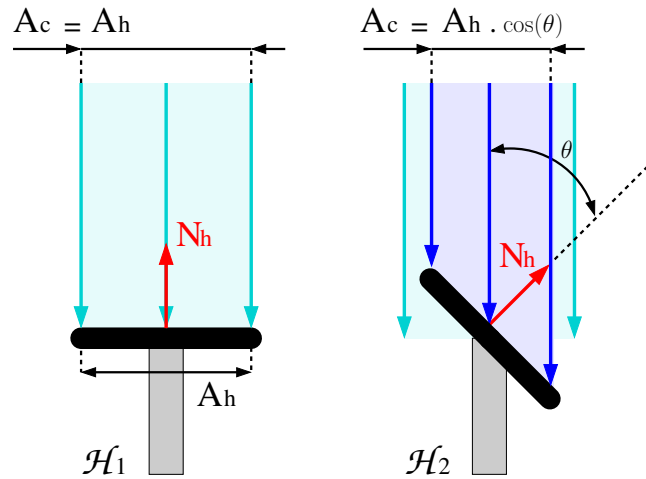


FIGURE 4.2 — Représentation de deux héliostats H_1 et H_2 de surface A_h et de normale N_h , recevant le rayonnement solaire direct (en bleu). L'héliostat H_1 est horizontal (au repos), et l'héliostat H_2 incliné d'un angle θ . A_c est la surface projetée de l'héliostat H_2 perpendiculaire au rayonnement incident.

2. **L'efficacité d'ombrage** : L'efficacité d'ombrage, notée η_{omb} , représente le rapport entre le flux direct réellement collecté par le champ d'héliostats et le flux direct qui aurait dû être collecté, en l'absence d'ombrage, par le champ d'héliostats. En effet, un héliostat peut faire de l'ombre à un autre héliostat

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

comme illustré sur la figure 4.3.

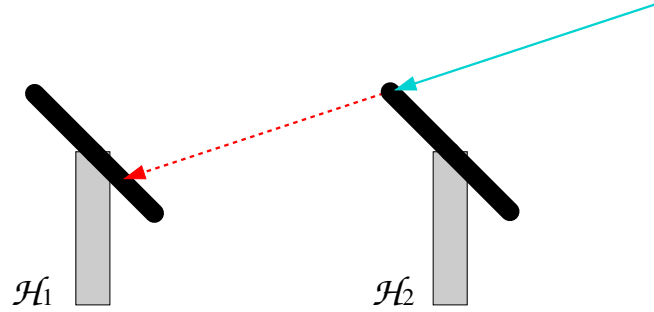


FIGURE 4.3 – Représentation de deux héliostats H_1 et H_2 avec en bleu un rayon issu du rayonnement solaire direct atteignant la surface de l'héliostat H_2 , et en rouge la trajectoire de ce même rayon qui devait atteindre H_1 si il n'était pas dans l'ombre de H_2 .

3. **L'efficacité de réflectivité** : L'efficacité de réflectivité, notée η_{ref} , est définie comme le rapport entre le flux direct reçu et le flux direct réfléchi par le champ d'héliostats. Ce paramètre est directement lié au matériau utilisé pour la réflexion et à la salissure à la surface des héliostats (par exemple : par de la poussière désertique).
4. **L'efficacité de blocage** : L'efficacité de blocage η_{blo} , désigne le rapport entre le flux direct réfléchi par le champ d'héliostat qui ne devrait pas être bloqué par un obstacle dans le trajet héliostat-récepteur et le flux direct réfléchi par le champ d'héliostats. Similairement à l'efficacité d'ombrage, un héliostat donné H_2 peut bloquer une partie du rayonnement réfléchi par un héliostat H_1 . La figure 4.1 montre la différence entre les efficacités d'ombrage et de blocage.
5. **L'efficacité de débordement** : L'efficacité de débordement (spillage en anglais), notée η_{deb} , représente le flux direct réfléchi par le champ d'héliostats qui devrait atteindre sa cible (i.e. le récepteur) par rapport au flux direct réfléchi par les héliostats sans obligation d'atteindre sa cible. La perte liée à cette efficacité peut être due par exemple à une taille non suffisante du

récepteur, ou à des réflexions non spéculaires par une surface trop rugueuse.

6. **L'efficacité atmosphérique** : L'efficacité atmosphérique (entre les héliostats et le récepteur) représente le flux direct collecté par le récepteur par rapport au flux direct réfléchi par le champ d'héliostat qui devrait atteindre le récepteur. Cette efficacité est dépendante de la composition atmosphérique car impactée par l'extinction (absorption et diffusion) des composants atmosphérique (poussière, pollution urbaine, fumée, ...).

Un article de Rinaldi [59] parle d'une septième composante, liée à une perte située au niveau du récepteur, appelé perte d'absorbance ; elle comprend les pertes de réflexion, de convection et de chaleur du récepteur. Li [22] parle plutôt de perte d'absorption, la différence c'est qu'elle ne comprend pas de perte de réflexion et qu'elle est classée dans la catégorie des pertes de thermodynamique. Dans cette thèse, le récepteur est considéré comme parfait, ainsi la décomposition de l'efficacité optique se limite aux six composantes décrites précédemment.

4.1.2 Méthodes d'estimation existantes

L'estimation de chacune de ces composantes énoncées dans le paragraphe précédent dépend de la méthode utilisée. L'efficacité cosinus est la plus simple à déterminer, c'est en effet le résultat d'un simple produit scalaire. Pour déterminer les efficacités de blocage et d'ombrage, il existe par exemple plusieurs méthodes mathématiques [12, 86], de nouvelles méthodes plus rapides (approximation avec l'utilisation d'une méthode de sub-division spatiale moins gourmande en temps de calcul) ont également été publiées [87, 88]. En ce qui concerne l'efficacité de débordement, les codes de ray tracing comparent les rayons réussissant à atteindre leur cible (le récepteur) avec les rayons ratant leur cible ; et en dehors des codes de ray tracing, il existe par exemple une approximation par une méthode mathématique simplifiée (flux réfléchi par les héliostats décrit par une distribution normale circulaire) et plus rapide publiée récemment [89]. Pour l'efficacité atmosphérique, DELSOL3 utilise l'équation suivante qui permet une approximation de l'efficacité

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

atmosphérique en condition de ciel clair [59] :

$$(100 - \eta_{atm}) = 0.6739 + 10.46 R - 1.70 R^2 + 0.2845 R^3 \quad (4.3)$$

avec R la distance oblique de chaque miroir en kilomètres. Des études plus récentes estiment plus précisément cette efficacité atmosphérique en utilisant des méthodes de transfert radiatif considérant la variabilité atmosphérique (spatiale et temporelle) [35, 90, 36]. Pour la perte de réflectivité, des campagnes de mesures permettent de l'estimer en moyenne, Rinaldi prend, par exemple, une estimation fixe de 0,88 pour la centrale PS10 et 0,93 pour Gemasolar [59].

4.1.3 Importance de l'ordre et du poids

Dans cette section, un exemple de calcul des efficacités optiques d'une CST est présenté. Les composantes de l'efficacité optique ne sont pas commutatives, l'exemple permet de montrer l'importance de l'ordre dans les calculs des composantes.

La figure 4.4 montre la manière dont sont gérées les composantes de l'efficacité optique, à un instant donné t , dans une petite centrale de 3 héliostats localisée dans une atmosphère vide ($\eta_{atm} = 1$). On suppose qu'il n'y a pas de perte par débordement ($\eta_{deb} = 1$). Les héliostats ont tous une surface de 1 m^2 et trois obstacles ont été positionnés pour introduire des effets d'ombrage ou de blocage. $\eta_{cos_H_i}$, $\eta_{omb_H_i}$, $\eta_{ref_H_i}$ et $\eta_{blo_H_i}$ représentent respectivement les efficacités optiques cosinus, d'ombrage, de réflectivité et de blocage d'un héliostat i .

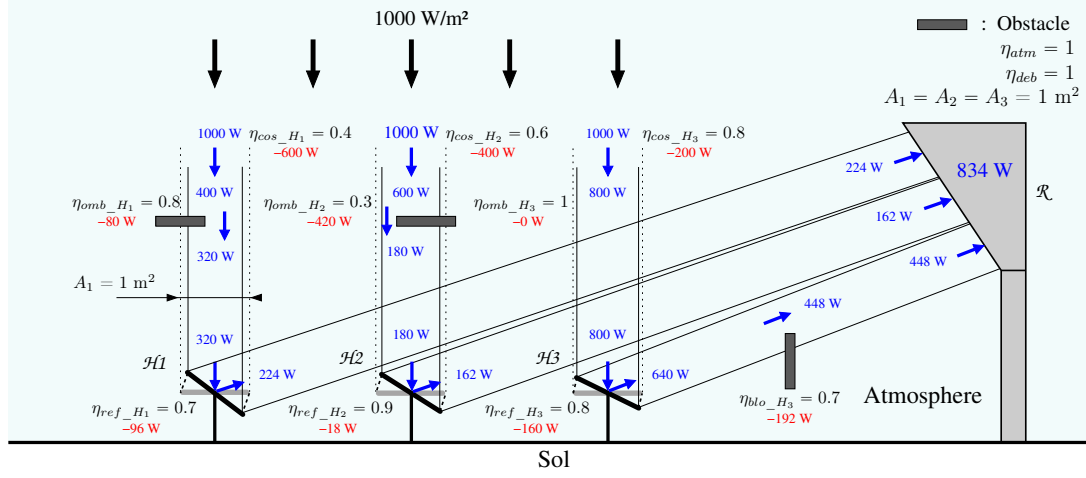


FIGURE 4.4 – Propagation du rayonnement solaire en direction un champ de 3 héliostats (H_1 , H_2 et H_3) et réfléchi vers le récepteur R (petite CST), dans une atmosphère supposée vide. $\eta_{\cos_H_i}$, $\eta_{omb_H_i}$, $\eta_{ref_H_i}$ et $\eta_{blo_H_i}$ sont respectivement les efficacités cosinus, d’ombrage, de réflectivité et de blocage d’un héliostat H_i ; η_{atm} et η_{deb} les efficacités atmosphérique et de débordement de la CST. En bleu le flux incident avant et après avoir subi des pertes, et en rouge le flux perdu.

Comme illustré sur la figure 4.4, le flux collecté par le récepteur R , Φ_{field} , est de 834 W, la surface totale du champs d’héliostats est de 3 m^2 et le DNI est de 1000 W/m^2 . En utilisant l’équation (4.1), cela donne une efficacité optique $\eta_{opt} = \frac{834}{3 \cdot 1000} = 0,278$. Dans le cas où l’ordre des poids de chaque composante n’est pas considéré, en faisant la moyenne de chaque composante (ex : $\overline{\eta_{\cos}} = (\eta_{\cos_H_1} + \eta_{\cos_H_2} + \eta_{\cos_H_3})/3$) l’efficacité optique η_{opt} est : $\eta_{opt} = \overline{\eta_{\cos}} \overline{\eta_{omb}} \overline{\eta_{ref}} \overline{\eta_{blo}} = 0,6 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 0,9 \approx 0,309$. Ce résultat est différent de la valeur de l’efficacité optique totale égale à 0.278. Les expressions correctes font intervenir une dépendance entre les composantes de l’efficacité optique. Par exemple, l’efficacité optique d’ombrage [équation (4.5)] dépend le efficacité cosinus; l’efficacité de réflectivité [équation (4.6)] dépend de l’efficacité d’ombrage qui dépend elle-même de l’efficacité cosinus, et ainsi de suite.

Rigoureusement, l’expression des efficacités optiques est :

$$\eta_{\cos} = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} (DNI A_i \eta_{\cos_H_i})}{DNI A_{field}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} (A_i \eta_{\cos_H_i})}{A_{field}} \quad (4.4)$$

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

$$\eta_{omb} = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} (A_i \eta_{cos_H_i} \eta_{omb_H_i})}{A_{field} \eta_{cos}} \quad (4.5)$$

$$\eta_{ref} = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} (A_i \eta_{cos_H_i} \eta_{omb_H_i} \eta_{ref_H_i})}{A_{field} \eta_{cos} \eta_{omb}} \quad (4.6)$$

$$\eta_{blo} = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} (A_i \eta_{cos_H_i} \eta_{omb_H_i} \eta_{ref_H_i} \eta_{blo_H_i})}{A_{field} \eta_{cos} \eta_{omb} \eta_{ref}} \quad (4.7)$$

$$\eta_{deb} = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} (A_i \eta_{cos_H_i} \eta_{omb_H_i} \eta_{ref_H_i} \eta_{blo_H_i} \eta_{deb_H_i})}{A_{field} \eta_{cos} \eta_{omb} \eta_{ref} \eta_{blo}} \quad (4.8)$$

$$\eta_{atm} = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} (A_i \eta_{cos_H_i} \eta_{omb_H_i} \eta_{ref_H_i} \eta_{blo_H_i} \eta_{deb_H_i} \eta_{atm_H_i})}{A_{field} \eta_{cos} \eta_{omb} \eta_{ref} \eta_{blo} \cdot \eta_{deb}} \quad (4.9)$$

où N_h est le nombre d'héliostats et A_i la surface d'un héliostat i . Les équations ci-dessus montrent bien l'importance de l'ordre (ou poids) donné aux composantes : la dernière composante η_{atm} va directement dépendre du résultat de toutes les composantes précédentes, là où la première composante η_{cos} est indépendante de toutes les autres.

En appliquant les expressions ci-dessus (en gardant le terme du DNI pour pouvoir suivre avec les flux de la figure 4.4) , cela donne :

$$\begin{aligned} \eta_{cos} &= \frac{\sum_{i=1}^{N_h} (1000 \cdot \eta_{cos_H_i})}{3000} = \frac{400 + 600 + 800}{3000} = 0,6 \\ \eta_{omb} &= \frac{400 \cdot 0,8 + 600 \cdot 0,3 + 800 \cdot 1}{1800} \approx 0,722 \\ \eta_{ref} &= \frac{320 \cdot 0,7 + 180 \cdot 0,9 + 800 \cdot 0,8}{1300} \approx 0,789 \\ \eta_{blo} &= \frac{224 \cdot 1 + 162 \cdot 1 + 640 \cdot 0,7}{1026} \approx 0,813 \\ \eta_{opt} &= \eta_{cos} \cdot \eta_{omb} \cdot \eta_{ref} \cdot \eta_{blo} \approx 0,278 \end{aligned}$$

Le résultat correspond bien à la valeur de l'efficacité optique calculé directement.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

4.2 Méthode d'estimation avec SMART-G

4.2.1 L'efficacité optique avec les modes A et B

Dans cette section, le détail du calcul de l'efficacité optique avec le code SMART-G est présenté. L'équation (4.1) de l'efficacité optique est utilisée où les termes Φ_{field} et DNI sont à déterminer.

Le flux collecté par le récepteur en provenance du rayonnement solaire direct réfléchi par le champ d'héliostats, Φ_{field} , est estimé par la moyenne empirique $\overline{\Phi_{field}}$ calculée selon les modes de lancement des photons A et B [même méthodologie que pour l'obtention des équations (3.11), (3.19) et (3.24), mais avec une fonction poids différente pour ne considérer que le flux direct] :

$$\Phi_{field} \simeq \overline{\Phi_{field}} = \frac{1}{N_{ph}} \sum_{i=1}^{N_{ph}} \hat{w}_{field}^{(j,i)} \quad (4.10)$$

où N_{ph} est le nombre de photons échantillonnés et $\hat{w}_{field}^{(j,i)}$ la fonction poids de chaque photon i qui dépend du mode de lancement. Dans l'équation ci-dessous $j=0$ correspond au mode de lancement A standard (abrégé A_1), $j=1$ au mode de lancement A avec l'option considérant l'angle solide solaire (abrégé A_2) et $j=2$ au mode de lancement B. L'équation générale pour tous les modes de la fonction poids $\hat{w}_{field}^{(j,i)}$ s'écrit :

$$\hat{w}_{field}^{(j,i)} = \begin{cases} C_{j,i} w_i(r_{2,i}) D_i & \text{si } [(j < 2 \text{ et } r_{2,i} \in \mathcal{D}_{S_r}) \text{ ou} \\ & (j = 2 \text{ et } r_{2,i} \in \mathcal{D}_{toa} \text{ et } |\vec{\omega}_{e,i} \cdot \vec{u}_{s-}| \geq \cos \delta_s)] \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.11)$$

où $w_i(r_{2,i})$ représente le poids d'un photon i à sa position finale $r_{2,i}$ (pour la considération de l'absorption atmosphérique); $\mathcal{D}_{S_r}$ et $\mathcal{D}_{toa}$ sont respectivement les domaines de définition de la surface du récepteur et de tout l'espace au delà du sommet de l'atmosphère (TOA); $\vec{u}_{s-}$ et $\vec{\omega}_{e,i}$ (mode B) sont respectivement la direction du rayonnement solaire inverse et la direction du photon i à sa position

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

finale $r_{2,i}$; D_i une constante qui vaut 0 dans le cas où le photon i a subi au moins une diffusion et 1 dans le cas contraire, pour ainsi ne considérer que le flux direct; et $C_{j,i}$ une constante définie par l'équation ci-dessous :

$$C_{j,i} = \begin{cases} E_{toa} |\vec{v}_s \cdot \vec{n}_{toa}| S_{toa} & \text{si } j = 0 \quad (\text{mode } A_1) \\ E_{toa} |\vec{\omega}_{s,i} \cdot \vec{n}_{toa}| S_{toa} & \text{si } j = 1 \quad (\text{mode } A_2) \\ \frac{E_{toa} S_r}{2(1-\cos\delta_s)} & \text{si } j = 2 \quad (\text{mode } B) \end{cases} \quad (4.12)$$

avec E_{toa} l'irradiance solaire à TOA, perpendiculaire au rayonnement solaire; S_{toa} et $\vec{n}_{toa}$ la surface de lancement des photons à TOA (modes A_1 et A_2) et sa normale orientée vers le sol; $\vec{u}_s$, δ_s et $\vec{\omega}_{s,i}$ respectivement la direction du rayonnement solaire, le rayon angulaire solaire et la direction d'un photon i échantillonnée dans l'angle solide solaire; et enfin, S_r la surface du récepteur.

Le terme du DNI est calculé en utilisant loi de Beer-Lambert (DNI stricte), en intégrant spectralement entre les longueurs d'onde λ_1 et λ_2 (généralement entre 250 et 4000 nm), l'irradiance solaire monochromatique $E_{TOA,\lambda}$ multiplié par la transmittance d'extinction :

$$DNI = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{toa,\lambda} e^{-\tau_{ext,\lambda}/\cos(SZA)} d\lambda \quad (4.13)$$

où $\tau_{ext,\lambda}$ représente l'épaisseur optique d'extinction monochromatique totale (qui tient compte des molécules, aérosols et nuages) et SZA l'angle zénithal solaire (Sun Zenith Angle en anglais).

L'équation permettant l'estimation de l'efficacité optique se retrouve à partir des équations (4.1), (4.10) et (4.13) :

$$\eta_{opt} \simeq \frac{\overline{\Phi_{field}}}{A_{field} \int_{250}^{4000} E_{toa,\lambda} e^{-\tau_{ext,\lambda}/\cos(SZA)} d\lambda} \quad (4.14)$$

Et finalement, l'écart-type de l'efficacité optique est estimé par l'équation ci-dessous :

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

$$\sigma[\eta_{opt}] \simeq \frac{\sigma_{ech}[\overline{\Phi_{field}}]}{A_{field} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{toa,\lambda} e^{-\tau_{ext,\lambda}/\cos(SZA)} d\lambda} \quad (4.15)$$

où $\sigma_{ech}[\overline{\Phi_{field}}]$ est l'erreur standard de la moyenne empirique du flux direct provenant du champ d'héliostat collecté par le récepteur $\overline{\Phi_{field}}$.

La section suivante présente le calcul de la décomposition de l'efficacité optique en six composantes. Cette décomposition ne peut être réalisée qu'avec le mode de lancement A qui suit le photon pas à pas du soleil vers le récepteur. Le mode B ne permet pas une décomposition complète, car les photons sont suivis en sens inverse à partir du récepteur et certaines composantes ne peuvent pas être estimées comme l'efficacité de débordement, de blocage et d'ombrage car par définition les photons "perdus" n'atteignent pas le récepteur. Cependant le mode B, qui est plus rapide que le mode A (dans le cas où l'on considère l'atmosphère), sera dans le chapitre 5 utilisé pour estimer le flux total collecté par le récepteur (flux total i.e. qui compte également les contributions atmosphérique liées à la diffusion ou réflexion). Le mode B sera également utilisé dans la section 4.3.3 pour estimer directement l'efficacité optique (pour sa validation en le comparant avec le mode A). Le calcul à partir du mode A est donc expliqué et sera utilisé pour estimer l'efficacité optique et plusieurs de ses composantes pour leurs validations à partir de résultats obtenus depuis un code indépendant, à savoir le code Solstice [13].

4.2.2 Décomposition de l'efficacité optique avec le mode A

Le mode A de lancement des photons, avec ou sans la considération de l'angle solide solaire, donne la possibilité d'estimer les six composantes de l'efficacité optique. Avec le mode A, toutes les composantes sont estimées par calcul Monte-carlo à l'exception de l'efficacité cosinus, qui est la seule composante calculée analytiquement à partir de l'équation ci-dessous :

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

$$\eta_{cos} = \frac{\sum_{i=1}^{N_h} (A_i |\vec{u}_{s-} \cdot \vec{n}_i|)}{A_{field}} \quad (4.16)$$

où N_h représente le nombre d'héliostats, A_i et $\vec{n}_i$ respectivement la surface et la normale de l'héliostat i , et $\vec{u}_{s-}$ la direction inverse solaire. Dans le cas où les héliostats sont composés de facettes, l'équation (4.16) peut être modifiée en changeant la variable h (pour héliostat) par f (pour facette).

Voici ci-après les flux utiles pour estimer les composantes restantes :

Φ_I : Le flux direct incident sur le champ d'héliostats. L'effet cosinus et les ombrages sont considérés.

$\Phi_{\rho+}$: Le flux direct réfléchi par le champs d'héliostats. L'effet cosinus, les ombrages et la réflectivité sont considérés.

$\Phi_{\rho-}$: Le flux direct non réfléchi par le champ d'héliostats. En d'autres mots, le flux direct perdu à cause de la réflectivité des héliostats.

Φ_{B+} : La portion du flux direct réfléchi par le champ d'héliostats qui ne devrait pas rencontrer d'obstacle durant le trajet héliostat-récepteur. Les rayons solaires directs bloqués ne sont pas comptés. Ici l'effet cosinus, les ombrages, la réflectivité et les blocages sont considérés.

Φ_{B-} : La portion du flux direct réfléchi par le champ d'héliostats qui devrait être bloqué par un obstacle (flux perdu) durant le trajet héliostat-récepteur.

Φ_{D+} : La portion du flux direct réfléchi par le champ d'héliostats qui devrait atteindre le récepteur. Ici tous les effets sont considérés à l'exception de l'efficacité atmosphérique.

Φ_{D-} : La portion du flux direct réfléchi par le champ d'héliostats qui ne devrait pas être bloqué par un obstacle mais qui devrait rater la surface du récepteur (flux perdu par débordement).

Dans SMART-G, les quantités présentées plus haut sont estimées suivant l'équation (4.10), mais avec les fonctions poids suivantes :

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

La fonction poids pour l'estimation du flux direct incident à la surface des héliostats :

$$\hat{w}_I^{(j,i)} = \begin{cases} C_{j,i} D_i w_i(r_{k,i}) & \text{si } r_{k,i} \in \mathcal{D}_{\mathcal{H}+} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.17)$$

La fonction poids pour l'estimation du flux direct réfléchi par les héliostats :

$$\hat{w}_{\rho+}^{(j,i)} = \begin{cases} C_{j,i} D_i \rho_i(r_{k,i}) w_i(r_{k,i}) & \text{si } r_{k,i} \in \mathcal{D}_{\mathcal{H}+} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.18)$$

La fonction poids pour l'estimation du flux direct absorbé à cause de la réflectivité des héliostats :

$$\hat{w}_{\rho-}^{(j,i)} = \begin{cases} C_{j,i} D_i (1 - \rho_i(r_{k,i})) w_i(r_{k,i}) & \text{si } r_{k,i} \in \mathcal{D}_{\mathcal{H}+} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.19)$$

La fonction poids pour l'estimation du flux direct réfléchi par le champ d'héliostats (le flux juste après la réflexion), des photons qui ne rencontrent pas d'obstacle sur le trajet héliostat-récepteur :

$$\hat{w}_{B+}^{(j,i)} = \begin{cases} C_{j,i} D_i \rho_i(r_{k,i}) w_i(r_{k,i}) & \text{si } (r_{k,i} \in \mathcal{D}_{\mathcal{H}+} \text{ et } \nexists \mathcal{R}(r_{k,i}) \cap \mathcal{D}_{\mathcal{H}}) \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.20)$$

La fonction poids pour l'estimation du flux direct réfléchi par le champ d'héliostats (le flux juste après la réflexion), des photons qui rencontrent un obstacle sur le trajet héliostat-récepteur :

$$\hat{w}_{B-}^{(j,i)} = \begin{cases} C_{j,i} D_i \rho_i(r_{k,i}) w_i(r_{k,i}) & \text{si } (r_{k,i} \in \mathcal{D}_{\mathcal{H}+} \text{ et } \exists \mathcal{R}(r_{k,i}) \cap \mathcal{D}_{\mathcal{H}}) \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.21)$$

La fonction poids pour l'estimation du flux direct réfléchi par le champ d'héliostats (le flux juste après la réflexion), des photons qui ne rencontrent pas d'obstacle

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

sur le trajet héliostat-récepteur et sont collectés par le récepteur :

$$\hat{w}_{D+}^{(j,i)} = \begin{cases} C_{j,i} D_i \rho_i(r_{k,i}) w_i(r_{k,i}) & \text{si } (r_{k,i} \in \mathcal{D}_{\mathcal{H}+} \text{ et } \nexists \mathcal{R}(r_{k,i}) \cap \mathcal{D}_{\mathcal{H}} \text{ et} \\ & \exists \mathcal{R}(r_{k,i}) \cap \mathcal{D}_{S_r}) \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.22)$$

La fonction poids pour l'estimation du flux direct réfléchi par le champ d'héliostats (le flux juste après la réflexion), des photons qui ne rencontrent pas d'obstacle sur le trajet héliostat-récepteur et ne sont pas collectés par le récepteur :

$$\hat{w}_{D-}^{(j,i)} = \begin{cases} C_{j,i} D_i \rho_i(r_{k,i}) w_i(r_{k,i}) & \text{si } (r_{k,i} \in \mathcal{D}_{\mathcal{H}+} \text{ et } \nexists \mathcal{R}(r_{k,i}) \cap \mathcal{D}_{\mathcal{H}} \text{ et} \\ & \nexists \mathcal{R}(r_{k,i}) \cap \mathcal{D}_{S_r})) \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases} \quad (4.23)$$

avec :

$r_{k,i}$ la position du photon i à sa première intersection avec une surface solide (sol, héliostats, etc.) ;

$w(r_{k,i})$ le poids du photon à la position $r_{k,i}$;

$\mathcal{D}_{\mathcal{H}}$ le domaine de définition de la surface totale (recto-verso) des héliostats ;

$\mathcal{D}_{\mathcal{H}+}$ le domaine de définition de la surface totale réfléchissantes (recto) des héliostats ;

$\rho_i(r_{k,i})$ la réflectivité de la surface solide à l'intersection $r_{k,i}$ avec le photon i ;

$\mathcal{R}(r_{k,i}) = \{ r_{k,i} + t\vec{u}_{k,i} \mid t \in]0, \infty) \}$ le domaine de définition du rayon après réflexion dans la direction $\vec{u}_{k,i}$ à la position $r_{k,i}$;

$\vec{u}_{k,i}$ la direction d'un photon i après réflexion par la surface solide à la position $r_{k,i}$.

En dehors de l'efficacité cosinus, les cinq autres composantes de l'efficacité optique sont estimées, en utilisant les flux présentées plus haut et l'équation (4.1), comme suit :

$$\eta_{omb} \equiv \frac{\Phi_I}{DNI A_{field} \eta_{cos}} \simeq \frac{\overline{\Phi_I}}{DNI A_{field} \eta_{cos}} \quad (4.24)$$

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

$$\eta_{ref} \equiv 1 - \frac{\Phi_{\rho-}}{\Phi_I} \simeq 1 - \frac{\overline{\Phi_{\rho-}}}{\overline{\Phi_I}} \quad (4.25)$$

$$\eta_{blo} \equiv 1 - \frac{\Phi_{B-}}{\Phi_{\rho+}} \simeq 1 - \frac{\overline{\Phi_{B-}}}{\overline{\Phi_{\rho+}}} \quad (4.26)$$

$$\eta_{deb} \equiv 1 - \frac{\Phi_{D-}}{\Phi_{B+}} \simeq 1 - \frac{\overline{\Phi_{D-}}}{\overline{\Phi_{B+}}} \quad (4.27)$$

$$\eta_{atm} \equiv \frac{\Phi_{field}}{\Phi_{D+}} \simeq \frac{\overline{\Phi_{field}}}{\overline{\Phi_{D+}}} \quad (4.28)$$

Et finalement, les écarts-types des cinq composantes sont estimés à partir des équations suivantes :

$$\sigma[\eta_{omb}] \simeq \frac{\sigma_{ech}[\overline{\Phi_I}]}{DNI A_{field} \eta_{cos}} \quad (4.29)$$

$$\sigma[\eta_{ref}] \lesssim \left| -\frac{1}{\overline{\Phi_I}} \right| \sigma_{ech}[\overline{\Phi_{\rho-}}] + \left| \frac{\overline{\Phi_{\rho-}}}{\overline{\Phi_I}^2} \right| \sigma_{ech}[\overline{\Phi_I}] \quad (4.30)$$

$$\sigma[\eta_{blo}] \lesssim \left| -\frac{1}{\overline{\Phi_{\rho+}}} \right| \sigma_{ech}[\overline{\Phi_{B-}}] + \left| \frac{\overline{\Phi_{B-}}}{\overline{\Phi_{\rho+}}^2} \right| \sigma_{ech}[\overline{\Phi_{\rho+}}] \quad (4.31)$$

$$\sigma[\eta_{deb}] \lesssim \left| -\frac{1}{\overline{\Phi_{B+}}} \right| \sigma_{ech}[\overline{\Phi_{D-}}] + \left| \frac{\overline{\Phi_{D-}}}{\overline{\Phi_{B+}}^2} \right| \sigma_{ech}[\overline{\Phi_{B+}}] \quad (4.32)$$

$$\sigma[\eta_{atm}] \lesssim \left| \frac{1}{\overline{\Phi_{D+}}} \right| \sigma_{ech}[\overline{\Phi_{field}}] + \left| \frac{\overline{\Phi_{field}}}{\overline{\Phi_{D+}}^2} \right| \sigma_{ech}[\overline{\Phi_{D+}}] \quad (4.33)$$

4.3 Résultats avec SMART-G sans atmosphère

Deux études de comparaisons sont présentées : 1) pour vérifier la réponse à la variabilité géométrique et 2) pour la validation de la modélisation géométrique. La première étude (section 4.3.2) compare les résultats obtenus avec SMART-G pour une simulation annuelle de la centrale PS10 avec des résultats publiés [91, 92, 88]. La deuxième étude (section 4.3.3) de comparaison est réalisée avec le code de ray tracing Solstice [13], pour deux moments de la journée, deux formes solaires différentes et deux valeurs de rugosité (à la surface d'un héliostat). Le code Solstice a récemment fait l'objet d'une étude d'inter-comparaison [93] avec d'autres codes bien connus dans les applications de centrale solaire à tour, dont par exemple Tonatiuh, Heliosim et Soltrace [94, 95, 96].

4.3.1 Application à la centrale PS10

Cette section présente la centrale solaire à tour PS10 (Planta Solar 10) [97], qui a été choisie car les données la concernant sont parmi les plus accessibles, mais aussi parce que les études qui utilisent cette centrale ne manquent pas [97, 92, 98, 99]. Cela permet l'établissement d'études de validations et de comparaisons. La centrale PS10 sera utilisée pour valider l'implémentation des objets 3D dans SMART-G (tests d'intersection, déplacements des objets avec les translations et rotations, etc), mais aussi la prise en compte du disque solaire (angle solide solaire) et la rugosité des héliostats.

La figure 4.5 montre la distribution spatiale (vue au nadir) des héliostats de la centrale PS10 à la surface terrestre par rapport à la position du récepteur ; l'axe des x est orienté vers la direction Nord-Sud, et l'axe des y vers la direction Ouest-Est. Le rayonnement solaire provient du Sud (derrière le récepteur) pour se diriger vers le champ d'héliostats. La table 4.1 regroupe les principales caractéristiques de la centrale avec : la localisation géographique (latitude et longitude) ; le nombre d'héliostats ; l'efficacité de réflectivité des héliostats fixée à 0,88 ; la largeur et longueur des héliostats ; l'altitude de chaque héliostat ; le nombre de

facettes dans chaque héliostat, avec leur distribution suivant la largeur et la longueur des héliostats ; l'inclinaison des facettes de type on-axis, qui signifie que le soleil est confondu avec le centre du récepteur pour le réglage de la courbure des héliostats (une fois la courbure obtenue, les héliostats sont orientés pour renvoyer le rayonnement incident vers le récepteur) ; et enfin, l'altitude, la hauteur, la largeur et l'inclinaison (par rapport au plan des directions Ouest-Est et Sol-TOA) du récepteur.

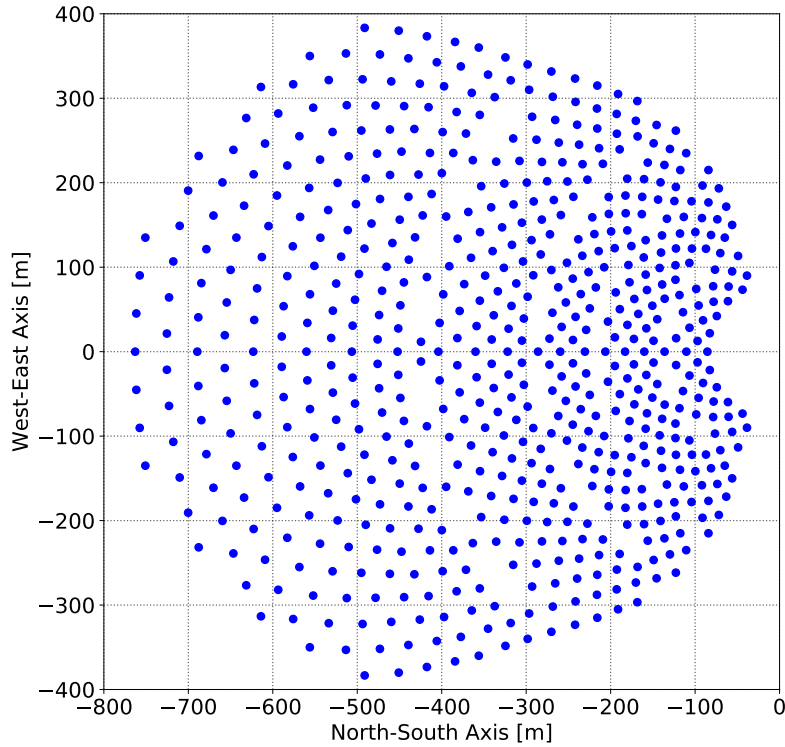


FIGURE 4.5 – Configuration du champs d'héliostats de la centrale PS10. Chaque point bleu représente un héliostat. La tour est aux coordonnées (0,0).

TABLE 4.1 – Informations sur les héliostats et le récepteur de la centrale PS10.

Localisation	
Latitude	37,44°
Longitude	-6,25°
Héliostats	
Nombre	624
Réfectivité	0,88
Largeur	12,84 m
Hauteur	9,45 m
Altitude du centre	5,17 m
Nombre de facettes	27
Nombre de facettes (axe de la largeur)	4
Nombre de facettes (axe de la hauteur)	7
Type d'inclinaison des facettes	On-axis
Récepteur	
Altitude du centre	106,38 m
Angle de l'inclinaison	11,5°
Largeur	13,8m
Hauteur	12 m

4.3.2 Comparaison avec des résultats annuels publiés

Les composantes de l'efficacité optique évaluées pour la comparaison sont l'efficacité cosinus, l'efficacité d'ombrage, l'efficacité de blocage et l'efficacité en débordement. Elle ne dépendent pas du milieu atmosphérique ce qui donne la possibilité d'effectuer des simulations avec une variation à pas constants pour les angles zénithal et azimutal comme dans Noone et al. [92]. Dans cette étude, la version python du paquet XEphem [100] est utilisée pour l'obtention de l'intégration temporelle qui dépend de l'heure, de l'année et de la position géographique. Des calculs contenant les estimations des quatre composantes de l'efficacité optique en fonction de l'angle zénithal (pas de un degrés) et de l'angle azimutal (pas de deux degrés) du soleil ont été tabulées. A partir de ces tables, une interpolation est effectuée par pas de temps de 10 minutes pour obtenir une intégration temporelle annuelle des efficacités optiques.

La table 4.2 montre les résultats annuelles (non pondérée par le DNI) des efficacités cosinus, d'ombrage, de blocage, d'ombrage+blocage (η_{ob}) et de débordement. Les résultats calculés avec SMART-G sont comparés avec des résultats publiés de trois autres codes indépendants. La valeur calculée de l'efficacité cosinus avec SMART-G est comme attendue concordante avec les valeurs obtenues par les autres codes (calculée analytiquement en tant que simple produit scalaire). Pour le produit des efficacités d'ombrage et blocage, une différence de 2 à 3 % est visible entre SMART-G et les résultats obtenus par Wei [91], Noone [92] et Eddhibi [88]. Wei [91] et Noone [92] considèrent un terme appelé "erreur optique" (après réflexion par les héliostats) de 2.9 mrad, ce qui impacte sur les valeurs de l'efficacité de débordement. Dans SMART-G, la rugosité de la surface des héliostats avec la distribution de Beckmann [101] a été introduite pour reproduire cette erreur optique. La table 4.2 montre qu'avec une rugosité de 1,336 mrad (ou 2,9 mrad avec un indice de confiance de 97 %) le résultat obtenu de l'efficacité de débordement devient consistant avec les valeurs obtenues par Wei [91] et Noone [92]. Comme attendu, les efficacités cosinus et d'ombrage sont indépendantes de la rugosité à la surface des héliostats (car les calculs sont effectués avant la ré-

flexion). Au contraire, bien que faible la rugosité introduite de 1,336 mrad induit une forte sensibilité de l'efficacité de débordement qui est presque inexistante pour l'efficacité de blocage.

Les comparaisons de cette section ne permettent pas de valider complètement la modélisation de la centrale PS10 sur SMART-G. Une différence d'environ 2 à 3 % reste visible par exemple pour le produit des efficacités d'ombrage et de blocage, et cette différence peut être due à une multitude de facteurs (intégration spatiale, choix de certains paramètres, méthodes utilisés pour le calcul des efficacités d'ombrages et blocages, etc). Pour la validation, nous allons comparer, dans la prochaine section, suivant les mêmes conditions de simulation, les résultats de SMART-G à deux heures de la journée avec les résultats du code de ray tracing Solstice.

TABLE 4.2 – Estimations annuelles (non pondérées par le DNI) de l'efficacité cosinus, d'ombrage, de blocage et de débordement obtenues avec SMART-G et trois autres codes utilisés par Wei [91], Noone [92] et Eddhibi [88]. η_{ob} fait référence au produit des efficacités d'ombrage et de blocage.

	SMART-G		Wei [91]	Noone [92]	Eddhibi [88]
	$S_r = 0$	$S_r = 1,336 \text{ mrad}$			
η_{cos}	0,8241	0,8241	0,824	0,8283	0,8241
η_{omb}	0,9046	0,9046	—	—	—
η_{blo}	0,9951	0,9952	—	—	—
η_{ob}	0,9002	0,9003	0,93	0,9255	0,9218
η_{deb}	0,9985	0,9931	0,993	0,9926	—

4.3.3 Validation avec le code de ray tracing Solstice

Dans cette section, le code de ray tracing Solstice est utilisé comme référence et est comparé à SMART-G. Comme précédemment, l'atmosphère n'est pas considérée (i.e. pas d'absorption et pas de diffusion) et l'efficacité de réflectivité des héliostats est parfaite ($\eta_{atm} = \eta_{ref} = 1$). Les angles zénithal et azimutal du soleil sont abrégés par les termes SZA et SAA (Sun Zenith Angle et Sun Azimuth Angle en anglais). L'étude se focalise sur deux heures du 21 mars, à midi (SZA=37,2° et SAA=180°) et le matin (SZA=72,7° et SAA=103,6°). Enfin, toutes les efficacités présentées dans cette section sont calculés avec Solstice et SMART-G avec une erreur standard inférieure à 0,01 %.

Sensibilité à l'angle solide solaire :

La table 4.3 montre à gauche les résultats obtenus avec Solstice, le 21 mars à midi pour deux valeurs du rayon angulaire solaire : 0,266° (rayon angulaire solaire réel) et 1° (valeur arbitraire) pour l'efficacité optique et quatre de ses composantes : l'efficacité cosinus, d'ombrage, de blocage et de débordement. Les résultats de SMART-G ont été comparés avec les résultats de Solstice. Les deux colonnes de droite de la table 4.3 contiennent les différences des calculs de SMART-G en mode A et B relativement au calculs de Solstice, selon l'équation suivante : $\text{diff}(\%) = [(\text{résultat SMART-G (A/B)} - \text{résultat Solstice}) / \text{résultat Solstice}] \times 100$. Les distributions du flux sur la surface du récepteur (pour un DNI à 1000 W/m²) des résultats de la table 4.3 sont disponibles sur la figure 4.6 avec dans la première colonne les distributions du flux obtenues avec Solstice et les deux colonnes qui suivent les distributions du flux (pas les différences) obtenues avec SMART-G mode A et B (en haut résultats avec $\delta=0.266^\circ$ et en bas avec $\delta=1^\circ$).

Avec l'augmentation du rayon angulaire solaire (voir la partie Solstice de la table 4.3), il n'y a pas de variation de l'efficacité cosinus, ce qui est cohérent (toujours le résultat du produit scalaire du rayonnement solaire avec l'héliostat/la facette). Les efficacités d'ombrage et de blocage ne varient également pas, ce qui montre potentiellement une très faible sensibilité de ces efficacités au rayon angulaire solaire.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

L'efficacité de débordement chute elle de presque 25 %, ce qui entraîne également la chute de l'efficacité globale (η_{opt}). Ce résultat est attendu car une tâche solaire plus grande (comparaison sur la figure 4.6 des parties Solstice avec $\delta_s=0.266^\circ$ et $\delta_s=1^\circ$) entraînent plus de photons en dehors de la surface du récepteur.

Nous observons pour le 21 mars à midi une différence relative maximale des résultats de SMART-G par rapport à Solstice d'environ 0,015 % (voir table 4.3 partie SMART-G A et $\delta_s=1$ avec l'efficacité de débordement). Les distributions du flux entre SMART-G et Solstice concordent également (voir figure 4.6). Ces comparaisons valident les résultats de SMART-G pour le 21 mars à midi.

Les descriptions de la table 4.4 et de la figure 4.7 sont identiques aux descriptions précédemment établis pour la table 4.3 et la figure 4.6, mais pour le 21 mars le matin. Avec l'augmentation du rayon angulaire solaire (voir partie Solstice de la table 4.3), nous observons le même comportement qu'à midi sauf que la variation des efficacités d'ombrage et de blocage, bien que très faible, est cette fois-ci visible. Les résultats de Solstice le matin par rapport à midi (voir colonne Solstice des tables 4.3 et 4.4) montrent une forte sensibilité de l'efficacité cosinus (environ 16 % moins efficace le matin) avec la direction solaire (SZA et SAA), ce résultat n'est pas surprenant car plus la direction solaire s'éloigne de la direction héliostat-récepteur plus l'efficacité cosinus est faible (l'efficacité cosinus est parfaite lorsque la direction solaire et la direction héliostat-récepteur sont colinéaires). Une forte sensibilité est également visible pour l'efficacité d'ombrage (une baisse d'environ 7 %). Les autres efficacités varient faiblement, avec le matin un peu plus de débordement (efficacités plus faibles), et un peu moins de blocage (efficacité plus forte). L'efficacité globale est ainsi surtout impactée par les efficacités cosinus et d'ombrage, dont l'impact sur la distribution du flux est visible avec une inclinaison de la tâche solaire le matin (comparaison des figures 4.6 et 4.7 avec les distributions du flux de la première colonne).

Comme à midi, nous observons le matin une différence relative maximale des résultats de SMART-G par rapport à Solstice d'environ 0,015 % (voir table 4.4 pour la partie SMART-G A et $\delta_s=1$ avec l'efficacité d'ombrage); avec encore comme à midi, des distributions du flux entre SMART-G et Solstice qui concordent

(voir figure 4.7). Ces résultats valident les implémentations effectuées dans SMART-G pour le 21 mars le matin et plus globalement valident les modes de lancement des photons A₂ (mode A avec l'option considérant l'angle solide solaire) et B présentés au chapitre 3.

TABLE 4.3 – L'efficacité optique totale η_{opt} et quatre de ses composantes calculées (avec une erreur standard inférieure à 0.01%) avec Solstice et avec SMART-G, en mode A et B, pour le 21 mars à midi pour deux valeurs du rayon angulaire solaire δ_s (en degrés). Les différences en pourcentage entre SMART-G (A/B) et Solstice sont données suivant le calcul : [(résultat SMART-G (A/B) - résultat Solstice)/résultat Solstice] x 100.

	Différences relativement à Solstice [%]					
	Solstice		SMART-G A		SMART-G B	
	$\delta_s=0.266$	$\delta_s=1$	$\delta_s=0.266$	$\delta_s=1$	$\delta_s=0.266$	$\delta_s=1$
η_{opt}	0,9206	0,7067	$+3,19 \times 10^{-3}$	$+1,02 \times 10^{-2}$	$+2,09 \times 10^{-3}$	$-4,49 \times 10^{-4}$
η_{cos}	0,9279	0,9279	$-2,07 \times 10^{-3}$	$+1,91 \times 10^{-4}$	$-2,07 \times 10^{-3}$	$+1,91 \times 10^{-4}$
η_{omb}	0,9983	0,9983	$-2,50 \times 10^{-3}$	$-5,78 \times 10^{-3}$	–	–
η_{blo}	0,9938	0,9939	$+7,55 \times 10^{-3}$	$+6,00 \times 10^{-4}$	–	–
η_{deb}	1,0000	0,7676	$+1,85 \times 10^{-4}$	$+1,54 \times 10^{-2}$	–	–

TABLE 4.4 – Identique à la table 4.3 mais pour le 21 mars au matin

	Différences relativement à Solstice [%]					
	Solstice		SMART-G A		SMART-G B	
	$\delta_s=0.266$	$\delta_s=1$	$\delta_s=0.266$	$\delta_s=1$	$\delta_s=0.266$	$\delta_s=1$
η_{opt}	0,7172	0,5330	$-3,91 \times 10^{-3}$	$-1,18 \times 10^{-3}$	$-6,61 \times 10^{-4}$	$-5,73 \times 10^{-3}$
η_{cos}	0,7825	0,7825	$-1,47 \times 10^{-3}$	$+2,87 \times 10^{-3}$	$-1,47 \times 10^{-3}$	$+2,87 \times 10^{-3}$
η_{omb}	0,9218	0,9217	$-2,82 \times 10^{-3}$	$-1,46 \times 10^{-2}$	–	–
η_{blo}	0,9961	0,9954	$+9,14 \times 10^{-5}$	$+8,16 \times 10^{-4}$	–	–
η_{deb}	0,9982	0,7425	$+3,00 \times 10^{-4}$	$+9,96 \times 10^{-3}$	–	–

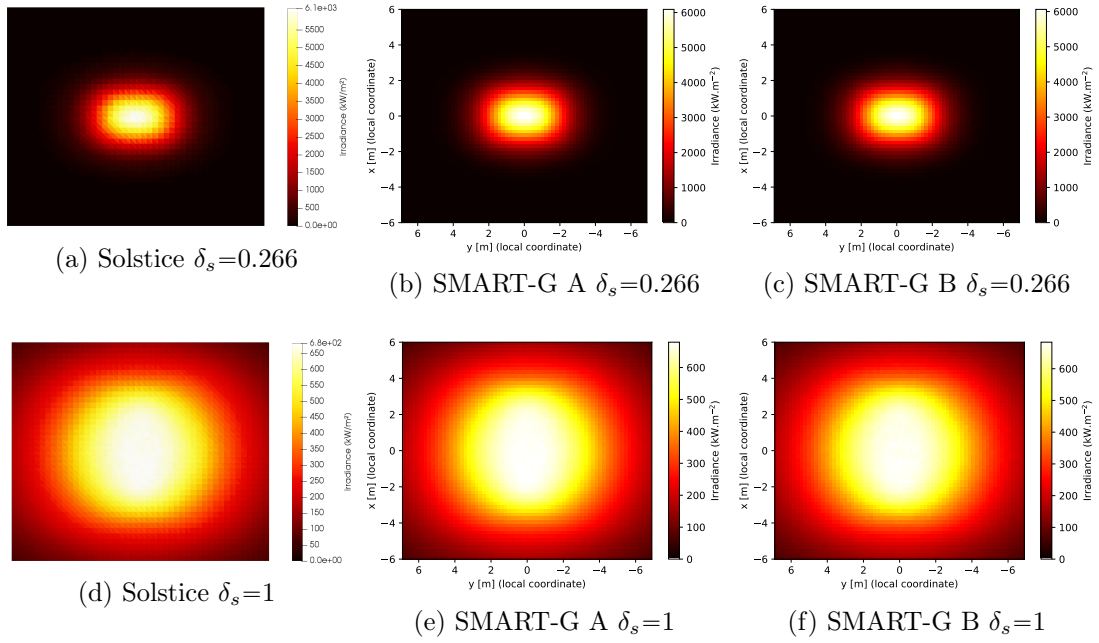


FIGURE 4.6 – Distribution du flux collecté à la surface du récepteur (DNI à 1000 W/m²) suivant les résultats obtenus avec Solstice et SMART-G mode A et B, le 21 mars à midi pour deux valeurs du rayon angulaire solaire δ_s (en degrés).

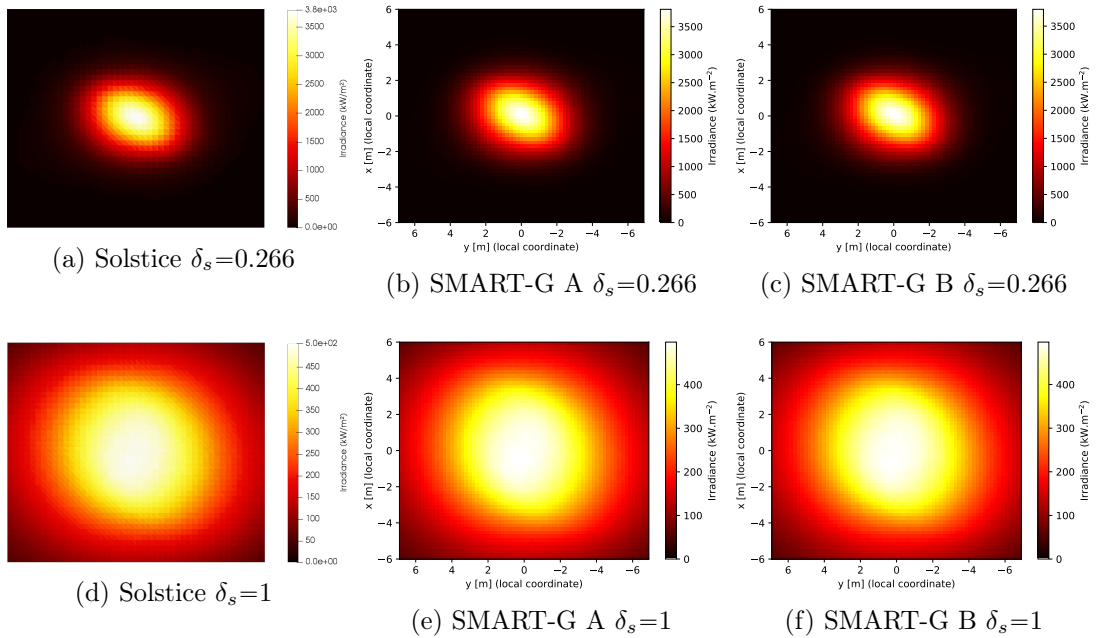


FIGURE 4.7 – Identique à la figure 4.6 mais pour le 21 mars au matin.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Sensibilité à la rugosité de la surface des héliostats :

Dans SMART-G, le modèle de micro-facettes (pour considérer la rugosité à la surface des héliostats) présenté par Walter et al. [101] avec la distribution de Beckmann a été implémenté. Cette distribution est également disponible dans le code Solstice permettant ainsi une comparaison des résultats obtenus.

Les tables 4.5 et 4.6 montrent, comme avec les tables 4.3 et 4.4, les résultats de l'efficacité optique et de quatre de ses composantes mais avec une source solaire ponctuelle (seulement le mode A pour SMART-G) et avec trois valeurs différentes de rugosité S_r : 0 mrad (cas d'un héliostat parfaitement lisse), 1 mrad et 5 mrad. Les distributions du flux sur le récepteur des résultats des tables 4.5 et 4.6 sont disponibles sur les figures 4.8 et 4.9, avec des descriptions identiques aux figures 4.7 et 4.8 mais avec une source solaire ponctuelle et une variation selon la rugosité S_r (en milliradians) des héliostats.

Le 21 mars à midi, l'augmentation de la rugosité des héliostats de 0 et 1 mrad (voir la colonne Solstice table 4.5) n'entraîne quasiment pas de variation de l'efficacité globale et de ses quatre composantes. L'impact de la rugosité de 1 mrad ne se voit qu'à travers la distribution du flux sur le récepteur (voir figure 4.8 1^{er} colonne avec $S_r=0$ et $S_r=1$). L'augmentation de la rugosité de 1 à 5 mrad n'entraîne toujours pas de variation des efficacités cosinus, d'ombrage et de blocage. Ce résultat est logique pour les efficacités cosinus et d'ombrage (car l'impact de la rugosité intervient après la réflexion par les héliostats). Pour l'efficacité de blocage c'est probablement dû à une très faible sensibilité à la rugosité. Nous observons une baisse d'environ 25 % de l'efficacité de débordement qui engendre la baisse également d'environ 25 % de l'efficacité globale, le débordement du rayonnement solaire du récepteur est visible avec l'observation de la distribution du flux à sa surface (voir figure 4.8 première colonne avec $S_r=5$).

Le 21 mars matin, nous observons le même comportement qu'à midi, sauf qu'il y a désormais entre 0 et 1 mrad (voir table 4.6 partie Solstice) une variation (faible) mais visible de l'efficacité de débordement. Entre 1 et 5 mrad, une autre variation (faible aussi) devient visible pour l'efficacité de blocage, ce qui confirme

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

l'existence d'une sensibilité (bien que faible) de l'efficacité de blocage à la rugosité. Les résultats du 21 mars le matin comparés aux résultats de midi montrent (peu importe la valeur de rugosité) une baisse significative des efficacités cosinus et d'ombrage (respectivement environ 16 % et 8 %), une faible diminution de l'efficacité de débordement et une faible augmentation de l'efficacité de blocage.

Tous les résultats de l'efficacité optique et de ses quatre composantes (voir les tables 4.5 et 4.6) montrent une différence relative maximale des résultats de SMART-G par rapport à Solstice d'environ 0,011 %; avec des distributions de flux similaires entre SMART-G et Solstice (voir figures 4.8 et 4.9). Ces résultats valident ainsi le mode de lancement des photons A_1 (mode A sans considération de l'angle solide solaire) et l'implémentation de la rugosité à la surface des héliostats.

TABLE 4.5 – L'efficacité optique et quatre de ses composantes calculées avec SMART-G et Solstice, le 21 mars à midi pour 3 valeurs de rugosité S_r (en milliradians). Les différences en pourcentage entre SMART-G A et Solstice sont données suivant le même calcul que donné dans la table 4.3.

	Solstice			Différences avec SMART-G A [%]		
	$S_r=0$	$S_r=1$	$S_r=5$	$S_r=0$	$S_r=1$	$S_r=5$
η_{opt}	0.9207	0.9206	0.6918	$-5,82 \times 10^{-3}$	$-7,08 \times 10^{-4}$	$+2,17 \times 10^{-3}$
η_{cos}	0.9279	0.9279	0.9279	$-1,64 \times 10^{-3}$	$-2,07 \times 10^{-3}$	$+2,99 \times 10^{-4}$
η_{omb}	0.9983	0.9983	0.9983	$-5,99 \times 10^{-3}$	$-8,97 \times 10^{-3}$	$+5,68 \times 10^{-3}$
η_{blo}	0.9939	0.9938	0.9938	$+1,79 \times 10^{-3}$	$+1,07 \times 10^{-2}$	$-5,43 \times 10^{-4}$
η_{deb}	1.0000	1.0000	0.7514	$+0,00 \times 10^{+0}$	$-2,61 \times 10^{-4}$	$-3,21 \times 10^{-3}$

TABLE 4.6 – Identique à la table 4.5 mais pour le 21 mars au matin

	Solstice			Différences avec SMART-G A [%]		
	$S_r=0$	$S_r=1$	$S_r=5$	$S_r=0$	$S_r=1$	$S_r=5$
η_{opt}	0.7178	0.7174	0.5441	$-7,64 \times 10^{-3}$	$+7,82 \times 10^{-3}$	$+3,10 \times 10^{-3}$
η_{cos}	0.7825	0.7825	0.7825	$-2,37 \times 10^{-3}$	$-3,65 \times 10^{-3}$	$+4,43 \times 10^{-4}$
η_{omb}	0.9218	0.9218	0.9219	$-4,49 \times 10^{-3}$	$+1,05 \times 10^{-2}$	$-5,10 \times 10^{-3}$
η_{blo}	0.9961	0.9961	0.9955	$-1,70 \times 10^{-3}$	$+6,01 \times 10^{-4}$	$-1,37 \times 10^{-3}$
η_{deb}	0.9991	0.9985	0.7577	$+9,05 \times 10^{-4}$	$+3,89 \times 10^{-4}$	$+9,05 \times 10^{-3}$

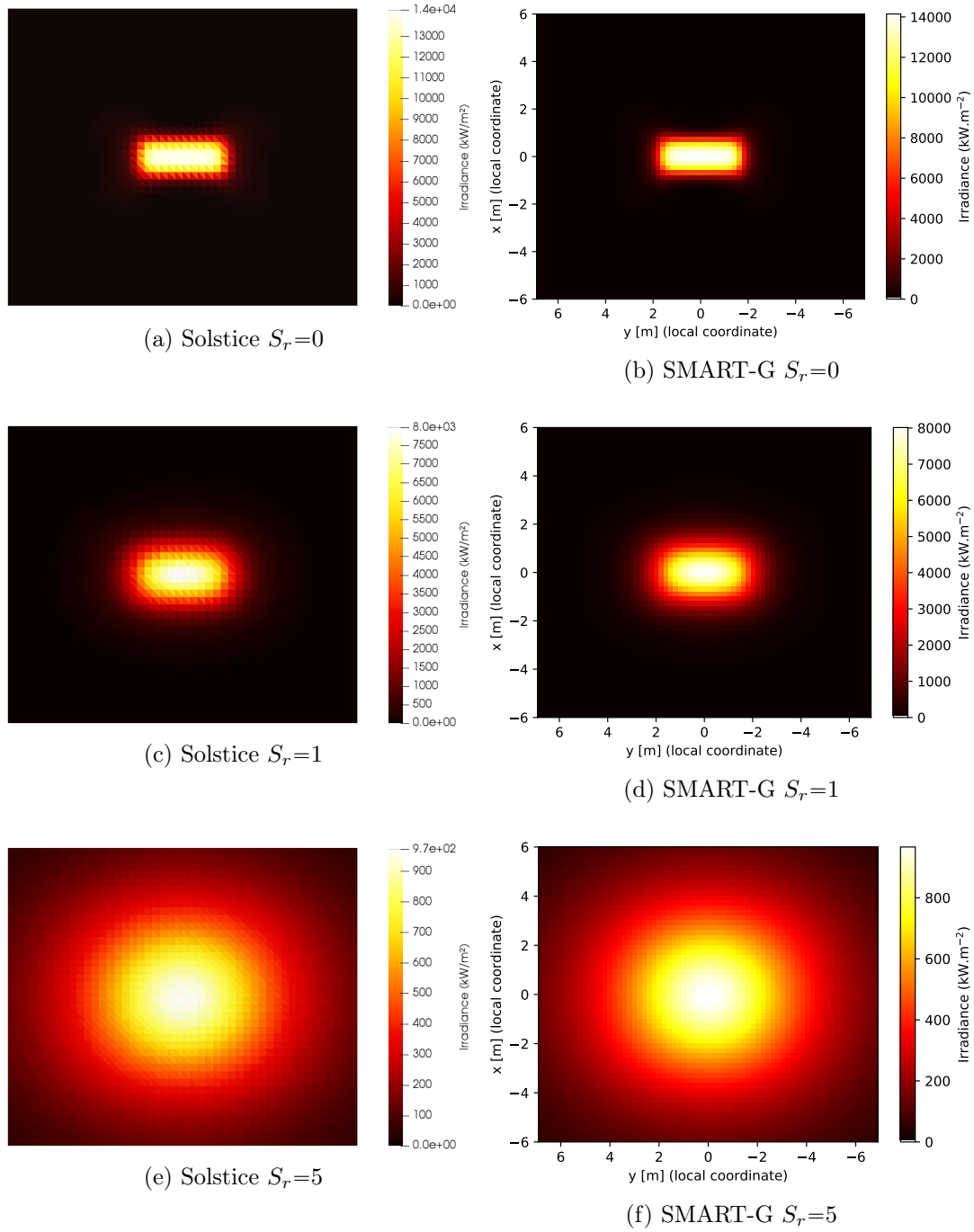


FIGURE 4.8 – Distribution du flux collecté à la surface du récepteur suivant les résultats obtenus avec Solstice et SMART-G mode A et B (avec un source solaire ponctuelle), le 21 mars à midi pour trois valeurs de rugosité S_r (en milliradians).

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

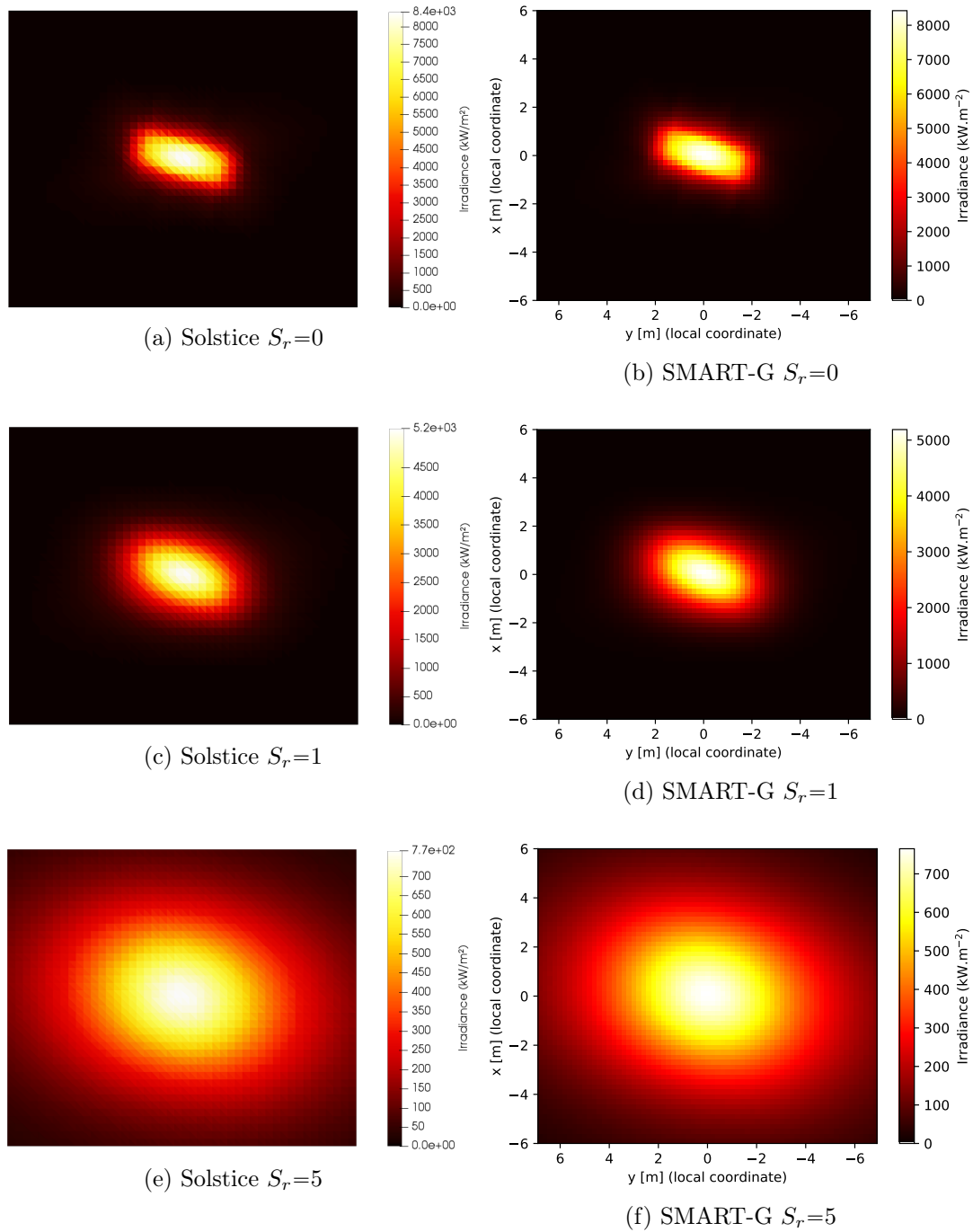


FIGURE 4.9 – Identique à la figure 4.8 pour le 21 mars au matin.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la méthode utilisée pour estimer l'efficacité optique pour les modes de lancement A et B a été présentée. En plus de l'efficacité optique, les équations pour estimer ses six composantes avec le mode A (le mode B ne le permettant pas complètement) sont également exposées. SMART-G comporte l'avantage de considérer l'atmosphère, ce qui n'est pas le cas avec les codes actuels permettant l'estimation de l'efficacité optique. Ainsi, les deux études de comparaison ont été effectuées sans prise en compte de l'atmosphère.

La première étude permet de vérifier la réponse à la variabilité géométrique de quatre composantes de l'efficacité optique (efficacité cosinus, d'ombrage, de blocage et de débordement), avec une simulation annuelle de la centrale PS10. Les résultats obtenus avec SMART-G ont été comparés avec des résultats publiés [91, 92, 88], où l'efficacité cosinus et de débordement sont validées. Cependant, une différence de 2 à 3 % est constatée sur le produit des efficacités d'ombrage et de blocage, qui peut être expliqué par plusieurs spécificités non détaillées dans les articles : intégration temporelle, dépendant du pas de temps (en minutes ou en angle, ...); intervalle angulaire; l'ordre donné aux composantes de l'efficacité optique, ect. Les efficacités comparées ne sont pas pondérées par le DNI, il y a donc également une grande sensibilité aux valeurs rasantes de l'angle zénithal solaire, qui pourrait aussi contribuer à cette différence de quelques pourcents.

La deuxième étude de comparaison a été effectuée avec le code de ray tracing Solstice, toujours avec la centrale PS10, pour deux instants (matin et midi du 21 mars), deux formes solaires et trois valeurs de rugosité. Tous les résultats obtenus (avec les deux instants, les deux formes solaires et les trois valeurs de rugosités) des efficacités cosinus, d'ombrage, de blocage et de débordement, avec une erreur standard relative de 0,01 %, montre une différence relative entre SMART-G et Solstice toujours inférieure à 0,015 %. Toutes les cartes de flux (distribution du flux sur le récepteur) calculées avec SMART-G et Solstice montrent également des résultats consistants, ce qui permet de valider l'estimation dans SMART-G des efficacités cosinus, ombrage, blocage et débordement, ainsi que de valider

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

l'implémentation de la rugosité et de la forme solaire (i.e. les modes de lancement des photons A et B développés et présentés dans le chapitre 3).

Dans le prochain chapitre, l'impact de la variabilité atmosphérique sera étudié, toujours à travers l'exemple de la centrale PS10. L'efficacité atmosphérique sera cette fois-ci estimée avec également l'estimation des contributions atmosphériques liées par les processus de diffusion et/ou de réflexion (actuellement possible qu'avec le code SMART-G depuis les modes de lancement A et B).

Chapitre 5

Impacts atmosphériques sur le flux collecté

Dans ce chapitre, l'impact de l'atmosphère sur le flux collecté par une Centrale Solaire à Tour (CST) est calculé et analysé. Les caractéristiques de la centrale espagnole PS10 introduites dans le chapitre 4 sont réutilisées, mais celle-ci est déplacée dans la ville de Ouarzazate (Maroc). Ce changement de localisation permet d'exploiter les mesures d'une station AERONET et d'analyser les effets de l'atmosphère à un endroit où les quantités d'aérosols sont importantes et très variables. Le chapitre commence par une description des "gains environnementaux", que nous pouvons désormais considérer grâce aux développements effectués dans le code SMART-G et présentés dans les chapitres 3 et 4. Dans la section suivante, la modélisation réalisée pour une année complète incluant l'atmosphère est présentée. Les calculs obtenus avec SMART-G sont ensuite analysés. Nous détaillerons en particulier la contribution des gains environnementaux sur le flux collecté et nous analyserons ensuite l'impact des aérosols sur ces gains et sur le flux collecté. Et enfin, nous verrons également une analyse de l'efficacité atmosphérique de la centrale.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Sommaire

5.1	Introduction	117
5.2	Gains environnementaux	118
5.3	Modélisation de la centrale et de l'atmosphère	119
5.4	Résultats obtenus avec SMART-G pour une année de simulations	122
5.4.1	Contribution des gains sur le flux collecté	122
5.4.2	Influence des aérosols sur les gains et le flux collecté . .	127
5.4.3	Analyses de l'efficacité atmosphérique	131
5.5	Conclusion	134

5.1 Introduction

L'un des principaux objectifs de la thèse est l'estimation réaliste et précise du flux collecté par une Centrale Solaire à Tour (CST). Pour ce faire, le code de Transfert Radiatif Atmosphérique (TRA) Monte-Carlo SMART-G est utilisé. Dans les chapitres précédents, les implémentations effectuées dans SMART-G, des outils nécessaires au calcul réaliste et précis du flux collecté ont été décrites, à savoir : incorporer des objets 3D, modéliser une centrale complète et réaliste (héliostats avec facettes et récepteur), estimer les pertes optiques et estimer les contributions du rayonnement solaire en provenance de toutes les directions possibles. Il est donc désormais possible d'analyser le flux collecté par une CST pour une localisation géographique donnée pendant une ou plusieurs années.

Dans ce chapitre, l'analyse du flux collecté par la centrale PS10 (présentée dans le chapitre 4), durant l'année 2014, supposée en Afrique du nord, plus précisément dans la ville de Ouarzazate (la centrale est en réalité située en Espagne) est réalisée. Ce choix géographique est guidé pour les raisons qui suivent : 1) réalisme plus important de l'impact des aérosols dans les zones désertiques, qui sont de plus en plus sollicitées pour la construction de CST (par exemple : Noor III, DEWA CSP, Shouhang Dunhuang, etc.) de par l'espace disponible et les valeurs importantes du DNI ; 2) présence d'une station du réseau Aerosol Robotic Network (AERONET) comportant des données décrivant la variabilité des propriétés optiques des aérosols ; et 3) variabilité importante des propriétés optiques des aérosols dans cette région du globe, ce qui permet de réaliser une étude de sensibilité de leur impact.

En comparaison avec les outils existants actuellement, le code SMART-G ne simule pas seulement le rayonnement solaire direct réfléchi par le champ d'héliostats, mais aussi le rayonnement solaire diffusé par l'atmosphère (dont i.g. la diffusion vers l'avant), réfléchi par le sol, etc. Ces contributions sur le flux collecté sont considérés en tant que "gains environnementaux". Le chapitre commence par une définition de ces gains. Les résultats obtenus avec SMART-G sur le flux collecté et les gains environnementaux (qui se basent sur les mesures des proprié-

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

tés optiques des aérosols d'une station AERONET) sont ensuite analysés. Ces résultats sont ensuite comparés avec des résultats obtenus suivant des propriétés optiques atmosphérique constantes tout au long de l'année et sans aérosols. Enfin, l'efficacité atmosphérique de la CST (voir chapitre 4 section 4.1) est également calculée et analysée.

5.2 Gains environnementaux

Avec les méthodes traditionnelles (voir chapitre 1 section 1.3 sur l'état de l'art) le flux collecté par le récepteur d'une CST est estimé en ne simulant que le rayonnement solaire direct (atténué par les composants atmosphériques) réfléchi par le champ d'héliostats. Ce flux est tout long du chapitre abrégé par "flux direct collecté", qui est également la référence pour le calcul de l'efficacité optique (voir l'équation 4.1 du chapitre 4). En réalité, cela ne représente pas la totalité du flux collecté par le récepteur car il faut y ajouter les flux issus du rayonnement diffusés par l'atmosphère, du rayonnement réfléchi par le sol ou même du rayonnement solaire réfléchi par un héliostat et diffusé par l'atmosphère avant d'atteindre le récepteur. La figure 5.1 montre quelques chemins optiques possibles du rayonnement solaire qui atteint le récepteur d'une CST composée de quatre héliostats. Les gains environnementaux (lignes discontinues formées des tirets en rouge) sont représentés par le rayonnement solaire atteignant le récepteur n'empruntant pas le chemin direct réfléchi par les héliostats (ligne continue en bleu). Contrairement aux codes de ray tracing, le code SMART-G permet la simulation de l'ensemble de ces chemins optiques, et ainsi de calculer et d'analyser, pour une série temporelle et une localisation géographique données, l'impact des gains environnementaux (atmosphère et sol) sur le flux total collecté par la CST.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

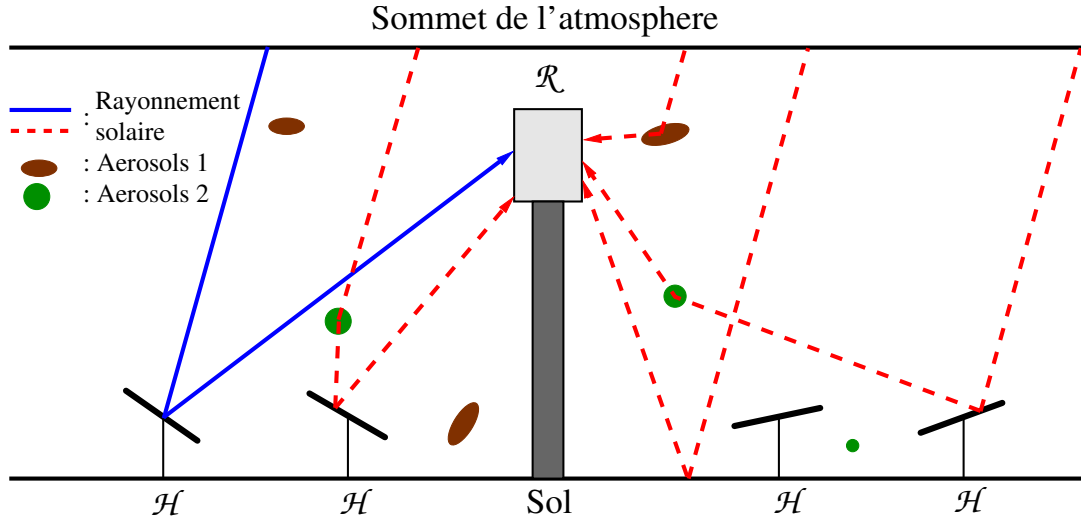


FIGURE 5.1 – Représentation schématique de quelques chemins optiques possibles que le rayonnement solaire peut emprunter avant d’atteindre le récepteur R d’une CST composée de 4 héliostats H . Les lignes rouges discontinues représentent les gains environnementaux. La ligne bleue montre le rayonnement solaire direct réfléchi par le champ d’héliostats et collecté par le récepteur.

5.3 Modélisation de la centrale et de l’atmosphère

La centrale PS10, présentée dans le chapitre 4, est reprise en gardant les mêmes caractéristiques (voir table 4.1). Pour rappel, c’est une centrale composée de 624 héliostats (eux-même composés de 27 facettes) avec un récepteur situé à une altitude d’environ 106 mètres.

La centrale, pour les études réalisées dans ce chapitre, est déplacée à Ouarzazate (Maroc), à une latitude et une longitude respectivement de $30,928^\circ$ et de $-6,913^\circ$. A l’instar de Elias et al. [102] : l’atmosphère choisie pour les profils atmosphériques (pression, température, etc.) est une atmosphère standard AFGL US [81]; les différents types d’aérosols sont représentés grâce à un mélange de modèles d’aérosols (voir les figures 5.2 et 5.3); et la variabilité de la hauteur de répartition des aérosols est considérée selon les couches limites fournies par le European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Le mélange d’aérosols est plus complet que celui utilisé dans Elias et al. [102] composé de

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

deux modèles d'aérosols. Trois modèles OPAC [103] sont utilisés et mélangés pour plus de réalisme : *continental_clean*, *desert* et *desert_coarse*. Comme le montre les figures 5.2 et 5.3, ce mélange permet, en jouant sur la quantité de chaque type d'aérosols, la reproduction des exposants d'Ångström et épaisseurs optiques en aérosol (AOT pour Aerosol Optical Thickness en anglais) mesurés à 440 et 870 nm par la station Aerosol Robotic network (AERONET) [104] à Ouarzazate en 2014 (données de niveau 2). La hauteur verticale des aérosols correspond à la moyenne mensuelle de la couche limite à Ouarzazate à 15 :00 UTC. L'épaisseur optique de la vapeur d'eau issue de l'atmosphère AFGL US est remise à l'échelle en fonction des mesures de vapeur d'eau fournies par la station AERONET. Les simulations sont réalisées, comme conseillé par Blanc et al. [61], en considérant le spectre solaire de 250 nm à 4000 nm et en utilisant une adaptation de la méthode de la k-distribution [49] pour prendre en compte l'absorption atmosphérique. La surface est définie comme Lambertienne avec un albédo de 0.25 [82]. Les simulations sont effectuées pour chaque mesure disponible (dépendant de la couverture nuageuse, des éventuelles pannes de l'instrument, d'une maintenance, d'un étalonnage, etc.) de la station AERONET, c'est-à-dire 8556 simulations (avec l'hypothèse qu'il n'y a pas de nuages pour les mesures disponibles).

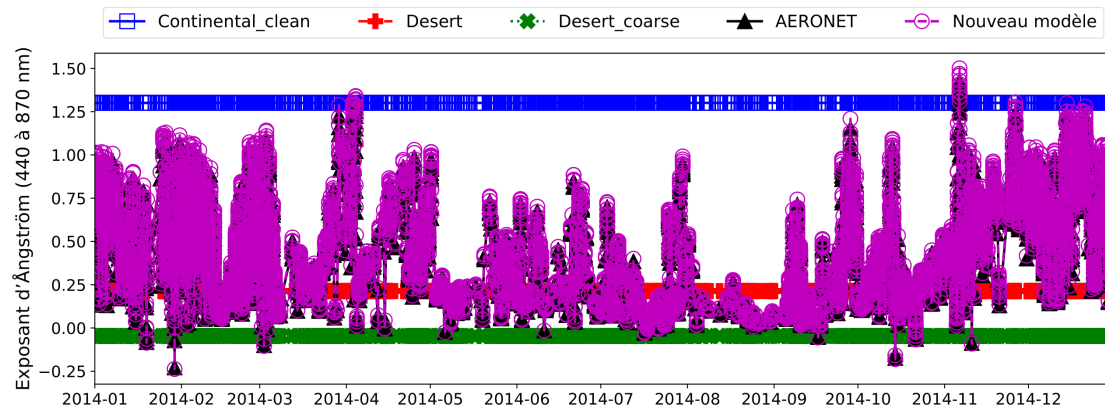


FIGURE 5.2 – Exposant d'Ångström entre 440 et 870 nm (en ordonnée) en fonction du temps (abscisse) des mesures AERONET, des trois modèles OPAC standard : *continental_clean*, *desert* et *desert_coarse*, et du nouveau modèle réalisé à partir des trois modèles OPAC.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

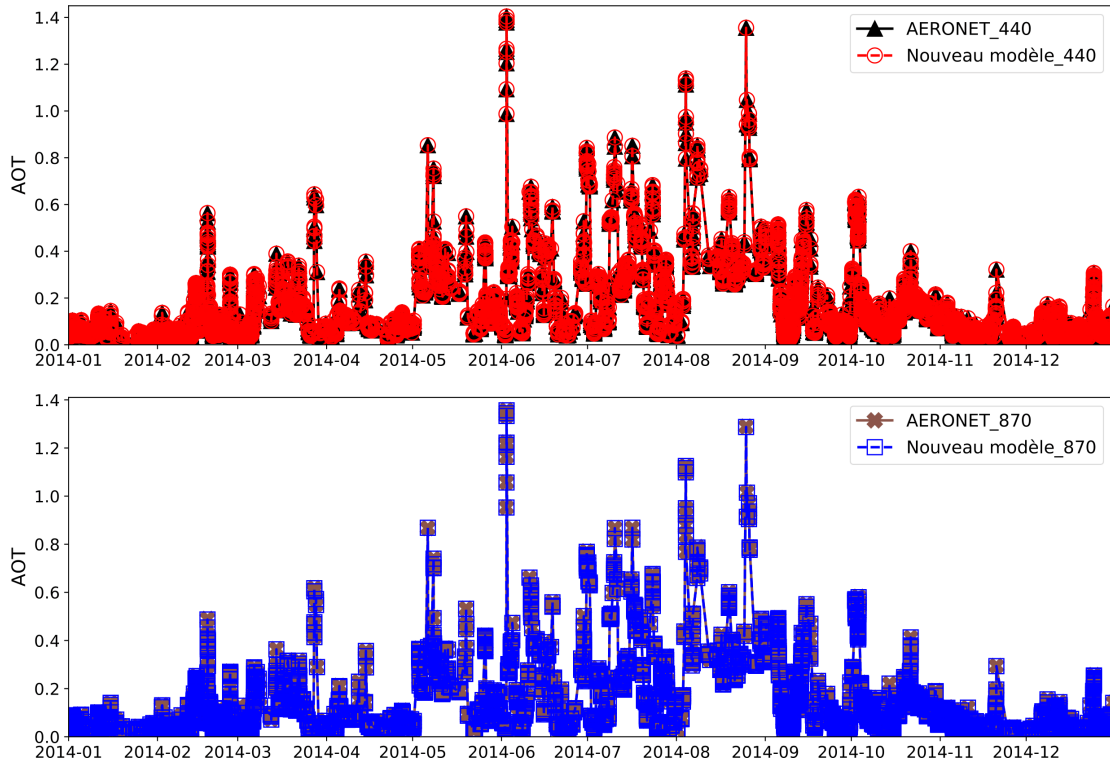


FIGURE 5.3 – Épaisseur optique des aérosols (AOT en ordonnée) en fonction du temps (abscisse) des mesures AERONET et du nouveau modèle réalisé à partir des modèles standards OPAC : *continental_clean*, *desert* et *desert_coarse*. En haut les valeurs à 440 nm, et en bas à 870 nm.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

5.4 Résultats obtenus avec SMART-G pour une année de simulations

5.4.1 Contribution des gains sur le flux collecté

Dans cette section, sont présentés les résultats obtenus avec SMART-G pour la contribution des gains environnementaux (voir section 5.2) sur le flux collecté par la centrale PS10 à Ouarzazate pendant l'année 2014. Les différents paramètres atmosphériques ont été présentés dans la section 5.3.

La table 5.1 montre la moyenne annuelle et les moyennes mensuelles du flux total collecté par le récepteur pour l'année 2014. Il est décomposé en deux flux : 1) le flux direct réfléchi par le champ d'héliostats collecté par le récepteur (abrégé par "flux direct collecté" ou directement par le mot "Direct"); et 2) le flux incident sur le récepteur ayant emprunté n'importe quels autres chemins optiques restants, comme le flux diffus, flux réfléchi par un héliostat puis diffus, réfléchi par le sol, etc. (i.e les gains environnementaux, abrégé par le mot "Gains"). En plus du flux collecté, la table 5.1 donne la moyenne annuelle et les moyennes mensuelles de l'AOT (à 550 nm), de l'exposant d'Ångström (entre 440 et 870 nm) et de la vapeur d'eau (H₂O en g/cm²). La table 5.1 indique dans la dernière colonne la proportion des gains environnementaux en fonction du flux direct collecté, calculée avec l'équation ci-dessous :

$$Gains[\%] = \frac{Total[MW] - Direct[MW]}{Direct[MW]} \times 100 = \frac{Gains[MW]}{Direct[MW]} \times 100 \quad (5.1)$$

Les évolutions du flux du direct et du flux des gains environnementaux (en mégawatts), du pourcentage de gains (relativement au flux du direct), de l'AOT, de l'exposant d'Ångström et de la vapeur d'eau en fonction des mois de l'année 2014 de la table 5.1 sont tracées sur les graphes des figures 5.4 et 5.5.

Les résultats montrent pour l'année 2014 une moyenne annuelle d'environ 0,8

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

% pour les gains environnementaux (voir la dernière colonne de table 5.1). L'évolution mensuelle (voir le graphe de droite de la figure 5.4) montre que pour la moitié de l'année 2014 (mi-printemps jusqu'à mi-automne) les gains environnementaux sont toujours supérieurs à 1 % et dépasse même 5 % pendant le mois d'août. Cette augmentation significative s'explique à la fois par une augmentation du flux lié aux gains environnementaux et par une diminution du flux direct collecté (l'épaisseur optique des aérosols étant plus élevée).

TABLE 5.1 – Moyenne annuelle et moyennes mensuelles (2014) de l'épaisseur optique des aérosols (AOT) à 550 nm, de l'exposant d'Ångström (440 à 870 nm), de la vapeur d'eau (H₂O) en g/cm², du flux total collecté par le récepteur (direct + gains), du flux direct réfléchi par les héliostats collecté par le récepteur (direct) et du flux des gains environnementaux collecté (gains). Les gains en pourcentage sont calculés suivant l'équation : Gains [%] = (Gains [MW] / Direct [MW]) × 100.

Résultats selon la modélisation de l'atmosphère présentée à la section 5.3.

	AOT	Å	H ₂ O	Flux [MW]			Gains [%]
				Total	Direct	Gains	
Année 2014	0,118	0,430	0,821	38,267	37,967	0,301	0,792
Janvier	0,039	0,564	0,657	46,016	45,885	0,131	0,286
Février	0,064	0,443	0,489	44,924	44,687	0,238	0,532
Mars	0,116	0,384	0,604	39,295	38,996	0,299	0,766
Avril	0,073	0,545	0,663	36,288	36,144	0,143	0,397
Mai	0,209	0,266	0,952	28,179	27,793	0,386	1,389
Juin	0,239	0,302	0,851	23,997	23,673	0,325	1,372
Juillet	0,253	0,218	0,948	21,216	20,604	0,612	2,971
Août	0,403	0,130	1,498	16,910	16,072	0,839	5,217
Septembre	0,132	0,296	1,118	38,886	38,414	0,472	1,228
Octobre	0,151	0,276	1,091	37,463	37,071	0,391	1,056
Novembre	0,048	0,610	0,998	45,370	45,226	0,144	0,318
Décembre	0,051	0,684	0,661	43,966	43,820	0,145	0,332

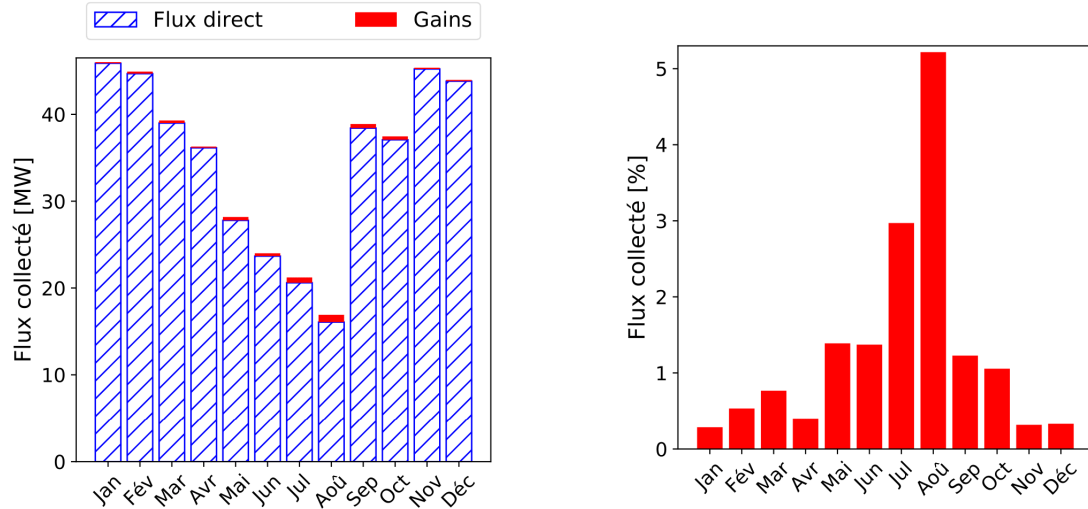


FIGURE 5.4 – Évolutions des moyennes mensuelles calculées du flux direct collecté (barre hachurée en bleu) et du flux des gains environnementaux (barre en rouge) collectés en fonction des mois de l'année 2014 à gauche, et à droite du pourcentage des gains environnementaux relativement au flux direct collecté.

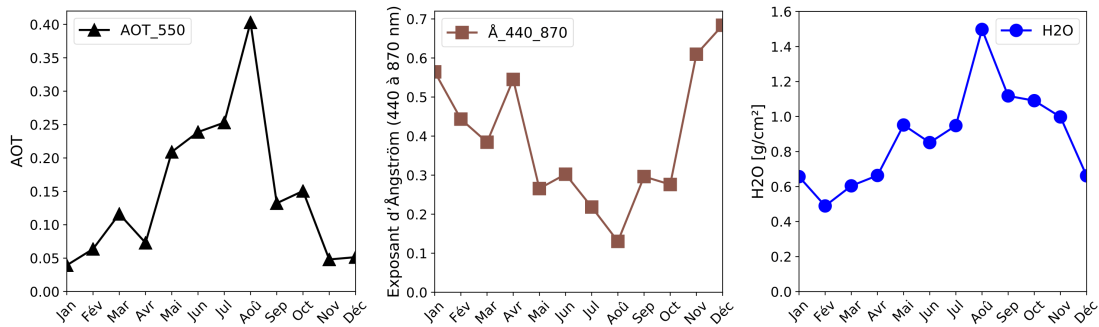


FIGURE 5.5 – Évolutions des moyennes mensuelles de l'épaisseur optique des aérosols à 550 nm (à gauche), de l'exposant d'Ångström entre 440 et 870 nm (au centre) et de la vapeur d'eau (à droite) en fonction des mois de l'année 2014.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

La figure 5.6 montre le pourcentage d'augmentation du flux dû aux gains environnementaux des 8556 simulations en fonction de l'épaisseur optique aérosols à 550 nm et de l'exposant d'Ångström calculé entre 440 et 870 nm. La figure montre que le pourcentage de gains croît avec l'augmentation de l'AOT et la diminution de l'exposant d'Ångström (bien visible avec le graphe de droite en échelle logarithmique de la figure 5.6). Il est logique que les gains augmentent avec la charge en aérosol qui combine une extinction plus importante du rayonnement direct et une augmentation de la contribution de l'atmosphère par diffusion. Les petites valeurs de l'exposant d'Ångström représentent de grosses particules désertiques (*desert coarse*) alors que les valeurs élevées correspondent à des aérosols continentaux en atmosphère propre (*continental clean*). Les particules désertiques, qui sont de grosses particules, entraînent une plus grande diffusion vers l'avant (voir la figure 2.5 du chapitre 2) expliquant ainsi l'augmentation des gains avec la décroissance de l'exposant d'Ångström.

La figure 5.7 est identique à la figure 5.6 pour les flux liés aux gains environnementaux en mégawatts. La figure 5.7 permet de s'affranchir de la diminution du rayonnement direct qui influe sur la valeur des gains en pourcentage. La même évolution que sur la figure 5.6 est visible avec des AOT inférieurs à 0,2 ; c'est-à-dire que les gains environnementaux croient avec l'augmentation de l'AOT et la diminution de l'exposant d'Ångström. Cependant, par rapport à la figure 5.6, on peut noter des gains environnementaux faibles pour les fortes valeurs d'AOT. L'extinction atmosphérique devient en effet si importante que seule une partie du rayonnement solaire atteint les basses couches atmosphériques où se situe la CST, le flux collecté par diffusion atmosphérique devient donc très faible.

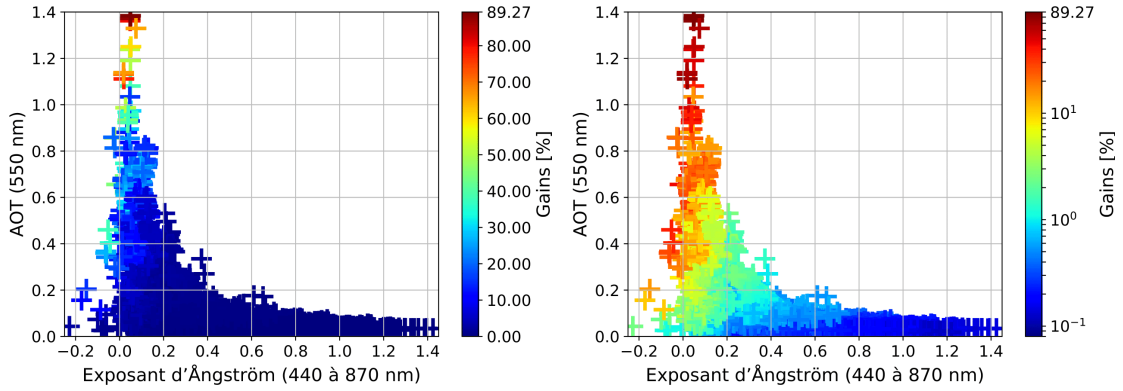


FIGURE 5.6 – Pourcentage des gains environnementaux (barre de couleur) relativement au flux direct collecté des 8556 simulations de l'année 2014 en fonction de l'épaisseur optique des aérosols à 550 nm (axe vertical) et de l'exposant d'Ångström de 440 et 870 nm (axe horizontal). A gauche avec une échelle normale et à droite avec une échelle logarithmique.

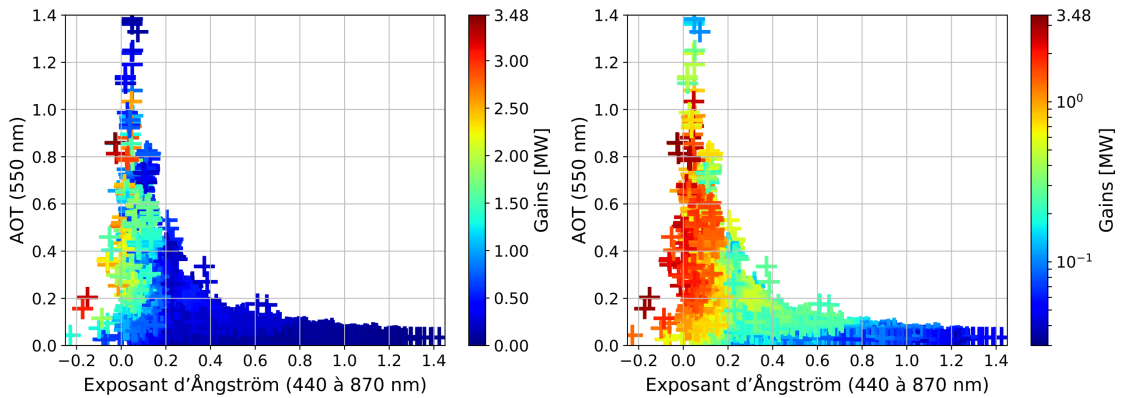


FIGURE 5.7 – Identique à la figure 5.6 pour les flux en mégawatts des gains environnementaux.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

5.4.2 Influence des aérosols sur les gains et le flux collecté

Afin d'estimer l'impact des aérosols sur les gains environnementaux et le flux collecté, les résultats obtenus à la section 5.4.1 (qui considère la variabilité des paramètres atmosphériques selon les mesures de la station AERONET de 2014) sont comparées avec de nouveaux résultats où les paramètres atmosphériques restent constants tout au long de l'année, sans les aérosols ($AOT=0$) et avec une quantité de vapeur d'eau fixe égale à la moyenne annuelle des mesures de la station AERONET qui vaut $0,821 \text{ g/cm}^2$.

Les simulations sont réalisées pour chaque point de mesure de la station AERONET, à savoir les 8556 points. Les caractéristiques de la centrale PS10, l'atmosphère AFGL US, la surface et la méthode d'intégration spectrale présentées dans la section 5.3 restent les mêmes.

La description de la table 5.2 est identique à la table 5.1 sans l'AOT, l'exposant d'Ångström et la vapeur d'eau, mais avec la moyenne annuelle et les moyennes mensuelles 2014 du SZA et SAA matin (matin nécessaire pour voir la sensibilité du flux collecté à SAA). Certaines valeurs mensuelles du SZA, comme celle d'Août, peuvent paraître étonnantes, étant donné que dans les zones de l'Afrique du Nord, on s'attend à avoir des valeurs plus faibles du SZA en été qu'en hiver. Cependant, comme le montre la figure 5.8 en comparant les mois d'août et janvier 2014, le nombre de valeurs est inégalement réparties sur la journée avec très peu de valeurs mesurées entre le début de la matinée jusqu'au début de l'après-midi durant ce mois. Ce manque de mesures dans la base de données AERONET peut être expliqué par le seuil de l'instrument sur l'épaisseur optique qui retire les valeurs importantes liées aux nuages ou à des tempêtes de désert très denses, mais aussi par d'autres facteurs comme évoqué dans la section 5.3 (panne, maintenance, etc.).

Les résultats (voir table 5.2) montrent une importante variation du flux collecté au cours de l'année (de 50 MW en janvier à 37 MW en juin). Avec des paramètres atmosphériques qui sont maintenant constants, la variation du flux collecté ne peut être due qu'à la position du soleil et à la distance terre-soleil (dis-

tance entraînant une variation d'environ 6 % de la constante solaire, i.e. des flux TOA, entre le périhélie et l'aphélie) qui varient tout au long de l'année. Dans le cas où la position solaire ne joue pas de rôle sur le flux collecté, avec une distance terre-soleil plus courte en été (août) qu'en hiver (janvier), le flux collecté doit être plus important en été. Cependant, on note une baisse importante du flux collecté en été par rapport à l'hiver, ce qui montre une plus forte sensibilité à la position solaire. La diminution du flux collecté est en grande partie liée à l'augmentation du SZA (visible en comparant les mois de juin et juillet avec SAA matin presque constant) et à l'augmentation du SAA matin (bien visible en comparant les mois de juin et décembre avec SZA presque constant). La figure 5.9 montre la variation, pour les 8556 simulations, du flux total collecté (direct + gains) en fonction du SZA (ordonnée) et du SAA (abscisse). A gauche de la figure, sont présentés les résultats de cette section i.e. avec la modélisation atmosphérique sans aérosols et constante au court de l'année, et à droite les résultats de la section 5.4.1 avec une modélisation atmosphérique selon les mesures de AOT, de l'exposant d'Ångström et de la quantité de vapeur d'eau de la station AERONET en 2014. Le graphe de gauche de la figure 5.9 montre et confirme la forte sensibilité du flux collecté par la centrale à SZA et SAA, avec une diminution du flux collecté lorsque SZA augmente et que le SAA s'éloigne de 180° (qui correspond à midi). Le graphe de droite montre l'impact des aérosols sur le flux collecté avec une diminution importante du flux liée à l'extinction du rayonnement due aux aérosols. On note aussi la disparition de la symétrie entre le matin ($SAA < 180^\circ$) et l'après-midi ($SAA > 180^\circ$), perturbée par la grande variation des aérosols en fonction de l'heure, du jour, de la saison et du mois.

Les résultats la table 5.2 indiquent un pourcentage moyen annuel des gains environnementaux inférieur à 0,05 %, et un pourcentage moyen mensuel maximal de 0,102 % (en juin). Ces gains sont liés à la diffusion moléculaire des gaz (atmosphère AFGL US sans aérosols). Sans aérosols, ce pourcentage est beaucoup plus faible en comparaison avec les résultats de la sections 5.4.1, où le pourcentage des gains annuel atteint 0,792 % et le pourcentage mensuel maximal 5,217 % (voir en août à la table 5.1).

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Cette étude avec et sans prise en compte des aérosols montre l'importance de l'impact des aérosols sur le rayonnement direct et surtout sur le calcul des gains environnementaux, et donc sur le flux total collecté (clairement visible en comparant les deux graphes de la figure 5.9).

TABLE 5.2 – Identique à la table 5.1 sans l'AOT, l'exposant d'Ångström et la vapeur d'eau mais avec en plus la moyenne annuelle et les moyennes mensuelles de l'année 2014 du SZA et SAA le matin.

	SZA	SAA(matin)	Moyenne (MW)			Gains (%)
			Total	Direct	Gains	
Année 2014	61,26	232,28	47,407	47,386	0,021	0,044
Janvier	63,45	215,25	50,055	50,038	0.017	0.034
Février	60,34	223,52	49,895	49,877	0.018	0.036
Mars	58,55	239,52	48,275	48,257	0.018	0.038
Avril	61,64	267,40	42,496	42,477	0.018	0.043
Mai	58,45	273,27	42,639	42,610	0.029	0.068
Juin	64,80	283,52	37,862	37,823	0.038	0.102
Juillet	67,79	281,88	36,952	36,917	0.035	0.094
Août	64,35	258,62	40,438	40,417	0.021	0.052
Septembre	54,79	240,08	49,587	49,567	0.020	0.040
Octobre	58,08	226,79	50,818	50,799	0.019	0.037
Novembre	61,40	214,11	51,280	51,262	0.018	0.035
Décembre	64,78	213,03	49,553	49,536	0.017	0.034

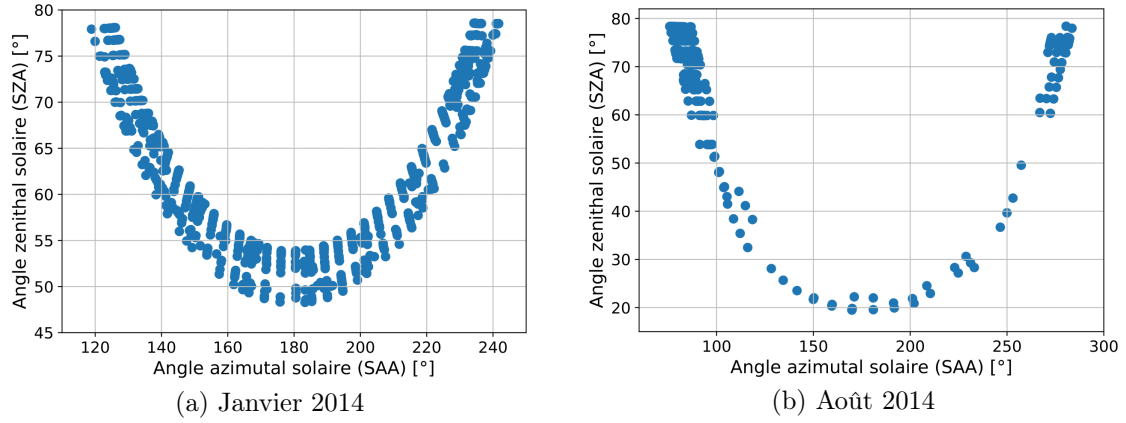


FIGURE 5.8 – Les points de mesure de la station AERONET de Ouarzazate en 2014 de niveau 2 en fonction de SZA (axe vertical) et de SAA (axe horizontal), pour les mois de janvier (a) et août (b).

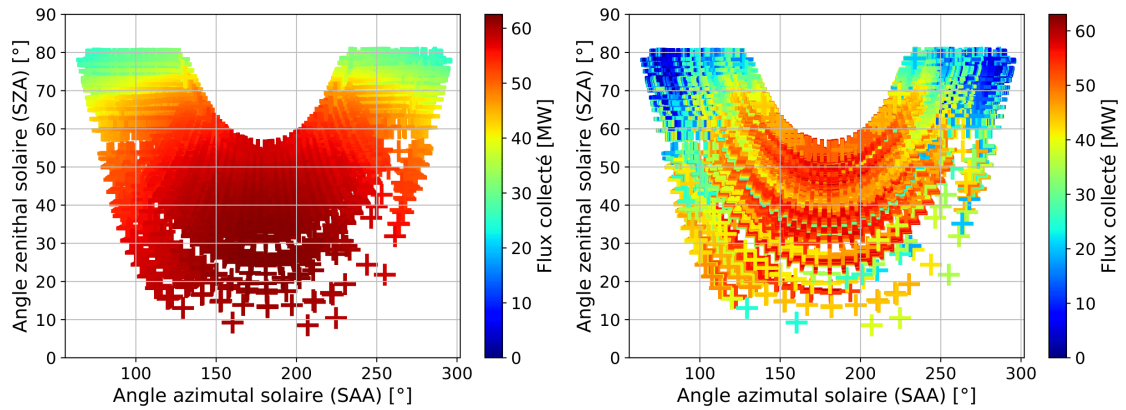


FIGURE 5.9 – Flux total collecté (direct + gains) en fonction du SZA (axe vertical) et SAA (axe horizontal) de l'année 2014 complète. A gauche, le cas avec une modélisation atmosphérique sans aérosols et constante tout au long de l'année, et à droite, le cas avec une modélisation atmosphérique variable en fonction du temps selon les mesures de la station AERONET 2014.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

5.4.3 Analyses de l'efficacité atmosphérique

L'efficacité atmosphérique d'une CST représente la transmittance d'extinction globale de la centrale entre les héliostats et le récepteur, dépendant également de toutes les autres composantes de l'efficacité optique (voir la section 4.1 du chapitre 4 pour plus de détails). Dans cette section, l'efficacité atmosphérique η_{atm} de la centrale PS10 pour l'année 2014 (selon la modélisation atmosphérique présentée à la section 5.3) est calculée avec SMART-G (voir section 4.2.2 du chapitre 4), et est comparée à la transmittance d'extinction de la distance oblique moyenne héliostat - récepteur T_{DHR}^{ext} (abrégié par "transmittance oblique") calculée via la loi de Beer-Lambert. Ce calcul correspond à l'application de l'approche proposée par Elias et al. [90] validée récemment par des mesures d'instruments de télédétection [105]. La comparaison permet de voir l'impact des efficacités cosinus, d'ombrage, de réflectivité, de blocage et de débordement sur le calcul de l'efficacité atmosphérique.

L'efficacité atmosphérique et la transmittance oblique, à un instant donné, intégrées spectralement (ici entre 250 et 4000 nm), respectivement η_{atm} et T_{DHR}^{ext} , sont calculées en pondérant avec le DNI monochromatique :

$$\eta_{atm}(250, 4000) = \frac{\int_{250}^{4000} DNI_{\lambda} \eta_{atm,\lambda} d\lambda}{\int_{250}^{4000} DNI_{\lambda} d\lambda} \quad (5.2)$$

$$T_{DHR}^{ext}(250, 4000) = \frac{\int_{250}^{4000} DNI_{\lambda} T_{DHR,\lambda}^{ext} d\lambda}{\int_{250}^{4000} DNI_{\lambda} d\lambda} \quad (5.3)$$

où $\eta_{atm,\lambda}$, $T_{DHR,\lambda}^{ext}$ et DNI_{λ} représentent respectivement les valeurs monochromatiques à la longueur d'onde λ de l'efficacité atmosphérique, la transmittance oblique et le DNI.

La moyenne annuelle et les moyennes mensuelles de l'efficacité atmosphérique et de la transmittance oblique sont calculées en étant pondérées avec les variations

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

temporelles au cours de la journée et de l'année du DNI :

$$\overline{\eta_{atm}}(t_0, t_1) = \frac{\int_{t_0}^{t_1} DNI(t) \eta_{atm}(t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} DNI(t) dt} \quad (5.4)$$

$$\overline{T_{DHR}^{ext}}(t_0, t_1) = \frac{\int_{t_0}^{t_1} DNI(t) T_{DHR}^{ext}(t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} DNI(t) dt} \quad (5.5)$$

avec t_0 et t_1 les dates de début et de fin de l'année pour l'intégration annuelle et de début et de fin des mois pour les intégrations mensuelles.

La table 5.3 indique dans la première colonne les résultats du calcul annuel et des calculs mensuels de l'efficacité atmosphérique (avec SMART-G en mode A) et dans la deuxième colonne, les différences relatives entre la transmittance oblique et l'efficacité atmosphérique, suivant l'équation :

$$\text{Différence} = [(\overline{T_{DHR}^{ext}} - \overline{\eta_{atm}}) / \overline{\eta_{atm}}] \times 100 \quad (5.6)$$

Les différences relatives entre les deux méthodes apparaissent très faibles de l'ordre de centième de pourcents.

Pour compléter la Table 5.3, les évolutions des moyennes mensuelles 2014 de l'efficacité optique et de la transmittance oblique sont tracées sur le graphe de la figure 5.10. Comme les effets d'ombrage et de blocage des héliostats sont attendus plus importants pour les héliostats les plus éloignés du récepteur, on s'attendrait à avoir une différence notable entre les deux valeurs et en particulier à une efficacité atmosphérique potentiellement plus forte par rapport à transmittance oblique calculée pour les héliostats les plus proches.

Cependant, aucune différence entre l'efficacité atmosphérique et la méthode de la transmittance oblique n'est visible sur le graphe de la figure 5.10. L'évolution de la courbe concorde avec les évolutions mensuelles des AOT, exposant d'Ångström et vapeur d'eau de la figure 5.5. On retrouve la même forme de courbe entre février

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

et novembre de l'efficacité atmosphérique par rapport à la forme de la courbe de l'évolution mensuelle de l'exposant d'Ångström. Ce qui est logique sachant qu'un exposant d'Ångström mensuel faible indique la présence de particules désertiques entraînant donc à une transmittance plus faible. Les évolutions des valeurs de janvier à février et de novembre à décembre font exceptions à cause de la baisse significative de la vapeur d'eau à ces moments.

Les résultats de la table 5.3 montrent une différence relative maximale (annuelle et mensuelles) d'environ 0,035 % entre la transmittance oblique et l'efficacité atmosphérique. L'écart-type relative des efficacités atmosphériques est en moyenne estimé à 0,3 % [écart-type estimé suivant l'équation (4.33) du chapitre 4 qui tend à surestimer l'incertitude]. Les variations négatives et positives des différences entre l'efficacité atmosphérique et la transmittance oblique sont donc inclus dans l'erreur Monte-Carlo. Des différences aussi faibles montrent que l'impact des pertes optiques sur l'efficacité atmosphérique est négligeable, dans le cas de cette centrale.

TABLE 5.3 – Moyenne annuelle et moyennes mensuelles 2014 de l'efficacité atmosphérique $\overline{\eta_{atm}}$, et différences en pourcentage par rapport l'efficacité atmosphérique de la transmittance d'extinction de la distance oblique moyenne héliostats - récepteur $\overline{T_{DHR}^{ext}}$, calculés selon l'équation : $[(\overline{T_{DHR}^{ext}} - \overline{\eta_{atm}})/\overline{\eta_{atm}}] \times 100$.

	$\overline{\eta_{atm}}$	Différences avec $\overline{T_{DHR}^{ext}}$ [%]
Année 2014	0,9755	$-1,610 \times 10^{-3}$
Janvier	0,9809	$1,396 \times 10^{-3}$
Février	0,9812	$2,807 \times 10^{-3}$
Mars	0,9747	$-7,206 \times 10^{-3}$
Avril	0,9836	$1,013 \times 10^{-2}$
Mai	0,9725	$-3,164 \times 10^{-2}$
Juin	0,9777	$-2,247 \times 10^{-2}$
Juillet	0,9752	$-2,086 \times 10^{-2}$
Août	0,9589	$-3,451 \times 10^{-2}$
Septembre	0,9758	$-1,564 \times 10^{-2}$
Octobre	0,9675	$-9,940 \times 10^{-3}$
Novembre	0,9783	$9,195 \times 10^{-3}$
Décembre	0,9739	$1,411 \times 10^{-2}$

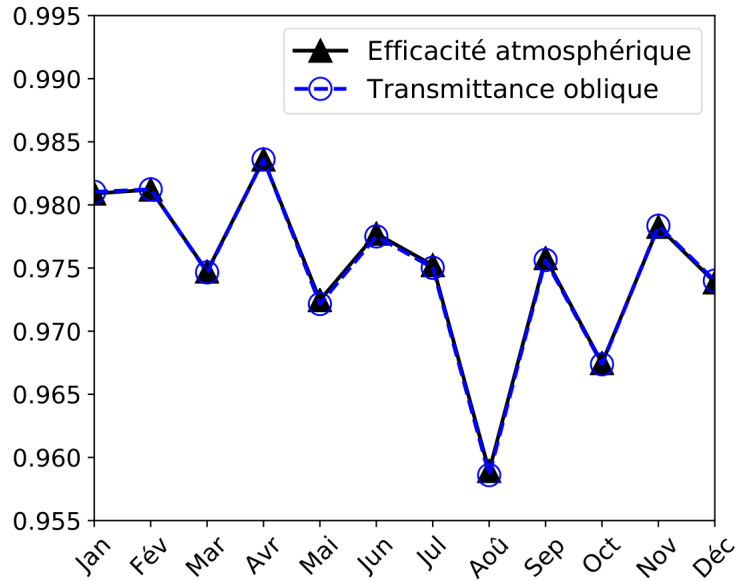


FIGURE 5.10 – Évolutions des moyennes mensuelles 2014 de l'efficacité atmosphérique (ligne continue noire) et la transmittance oblique (ligne de tirets bleu).

5.5 Conclusion

Grâce aux implémentations effectuées pendant ces travaux de thèse, SMART-G permet maintenant l'estimation du flux collecté par une CST tout en considérant, pour la première fois, en plus du flux direct réfléchi par le champ d'héliostats (abrégé par flux direct collecté), toutes les autres contributions sur le flux collecté (diffusion, réflexion par le sol, réflexion par un héliostat puis diffusion avant, etc.). Ces contributions additionnelles sont ainsi nommées les "gains environnementaux". SMART-G permet également une estimation plus réaliste de l'efficacité atmosphérique (la transmittance globale entre les héliostats et le récepteur qui tient compte des pertes de blocage, ombrage, etc.). Dans ce chapitre, l'estimation de l'apport de ces gains environnementaux par rapport au flux direct collecté traditionnellement estimé, ainsi qu'une estimation plus réaliste de l'efficacité atmosphérique ont été réalisés pour la centrale PS10 déplacée virtuellement dans une zone désertique au Maroc. La modélisation de l'atmosphère a été effectuée en s'appuyant sur les mesures de l'épaisseur optique des aérosols (AOT), de l'ex-

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

posant d'Angstrom et de la concentration en vapeur d'eau (H_2O en g/m^2) de la station AERONET à Ouarzazate pour l'année 2014.

Les résultats obtenus montrent des gains environnementaux annuels, relativement au flux direct collecté, de 0,8 % pour la centrale PS10 à Ouarzazate en 2014 (pour une moyenne annuelle de l'AOT de 0,118). Le cycle annuel de ces gains est important et leurs moyennes mensuelles peuvent dépasser 5 % (en août). D'autres résultats obtenus avec des paramètres atmosphériques constants tout au long de l'année et sans aérosols, montrent que les gains environnementaux annuels chutent et représentent moins de 0,05 % des gains par rapport au flux direct collecté avec mensuellement un maximum d'environ 0,1 %. Les gains environnementaux peuvent ainsi être négligés dans le cas où la centrale est localisée dans une zone avec une faible concentration d'aérosols, mais ne peuvent plus l'être dans des zones où la charge en aérosol de l'atmosphère est importante. Ils doivent absolument être considérés lorsque la CST est localisée dans une zone avec une importante concentration en aérosols comme à Ouarzazate en 2014.

L'efficacité atmosphérique a été estimée de manière plus réaliste avec SMART-G et a été comparée avec la transmittance d'extinction de la distance oblique moyenne héliostats – récepteur (abrégé transmittance oblique) calculée selon la méthode proposée par Elias et al. [90]. Les résultats montrent une différence relative maximale (annuelle et mensuelles) entre l'efficacité atmosphérique et la transmittance oblique faible d'environ 0,035 %. L'impact des efficacités cosinus, ombrage, réflectivité, blocage et débordement sur l'efficacité atmosphérique apparaît donc négligeable dans le cas de cette centrale. Ainsi l'estimation de l'efficacité atmosphérique (pour le cas de la centrale PS10 en 2014 à Ouarzazate) par le calcul direct (plus rapide) de la transmittance oblique est suffisante.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Conclusions générales et perspectives

La demande mondiale en énergie augmente régulièrement. Elle est actuellement encore majoritairement pourvue par l'exploitation d'énergie fossile (pétrole, charbon, gaz). Cependant ces énergies fossiles sont d'une part épuisables et les ressources accessibles s'amenuisent et d'autre part contribuent largement au réchauffement climatique. Les énergies renouvelables sont donc une alternative de plus en plus crédible.

Parmi l'ensemble des énergies renouvelables, l'exploitation de l'énergie solaire présente un fort potentiel au travers de différentes installations de grandes ampleurs. Les centrales solaires thermiques à tour (CST) se placent en bonne position et de nombreux projets sont en cours de réalisations ou en projets. Nous avons vu dans le premier chapitre que l'amélioration de la "bancabilité" d'une CST repose partiellement et fortement sur une estimation précise du flux radiatif solaire collecté par le récepteur de la centrale.

Nous avons également vu que, traditionnellement, ce flux est estimé en utilisant deux outils de manière complètement décorrélée et indépendante : 1) un code de Transfert Radiatif Atmosphérique (TRA) pour simuler le rayonnement solaire direct atteignant le sol depuis l'espace et 2) un code de ray tracing permettant de simuler le rayonnement solaire direct réfléchi par le champ d'héliostats et incident au récepteur. Pour simplifier, ce flux estimé en ne considérant que le rayonnement solaire direct réfléchi par les héliostats est abrégé par "flux direct collecté".

Pour améliorer la précision sur le flux collecté, nous avons proposé à la fin de

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

ce premier chapitre, le développement d'une version améliorée d'un code de TRA Monte-Carlo, où la CST est incorporée dans une atmosphère réaliste. Ainsi, en plus du flux direct collecté, d'autres contributions dues aux processus de diffusion par l'atmosphère et/ou de réflexion par le sol sont prises en compte pour estimer le flux réellement collecté. Nous appelons ces contributions supplémentaires les gains environnementaux. On peut citer par exemple, le rayonnement solaire réfléchi par le champ d'héliostats atteignant le récepteur grâce à une diffusion, le rayonnement diffusé par l'atmosphère atteignant le récepteur sans être réfléchi par les héliostats, le rayonnement réfléchi par le sol, etc. Nous abrégeons le flux réellement collecté (flux direct collecté + gains environnementaux) par "flux réel collecté".

Le flux réel collecté est-il significativement différent des estimations du flux direct collecté ? Nous avons pu répondre à cette question dans cette thèse, dont la réponse diffère selon le lieu où est située la CST.

Dans le cinquième et dernier chapitre, après avoir développé et validé dans les chapitres 3 et 4 la nouvelle version du code de TRA Monte-Carlo, nous avons, pour l'année complète 2014, estimé le flux réel collecté d'une véritable centrale (centrale espagnole PS10 à 11 MW), mais que nous avons virtuellement déplacée à Ouarzazate (Maroc). Le "déplacement" de la centrale au Maroc est pertinent pour l'étude de l'impact des aérosols, sachant que la construction des CST s'effectue généralement dans ces milieux désertiques. La différence entre le flux réel collecté et le flux direct collecté apparaît significative. Pour une moyenne annuelle d'épaisseur optique en aérosol (AOT) de 0,12, nous obtenons une moyenne annuelle du flux réel collecté qui est de 0,3 MW (0,8 %) plus élevée que le flux direct collecté. Les résultats avec les moyennes mensuels peuvent atteindre pour le mois d'août 0,84 MW (5,2 %) avec une AOT de 0,4. Ces résultats sont représentatifs du milieu désertique de la ville de Ouarzazate, où l'AOT est supérieur à la moyenne globale terrestre, mais qui reste inférieure par rapport à d'autres zones comme le désert saharien et le désert d'Arabie (notamment au Émirat Arabes Unis).

Dans ce chapitre 5, nous avons également fait une estimation du flux collecté mais sans les aérosols. La diffusion moléculaire de l'atmosphère entraîne également des gains environnementaux sur le flux collecté, mais cette fois-ci avec un

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

pourcentage négligeable avec annuellement 0,04 % et un maximum mensuel (en juin) de 0,1 % contre précédemment respectivement 0,8 % et 5,2 %.

Pour conclure, ces résultats montrent que la nouvelle version du code est essentielle pour correctement estimer le flux réel collecté dans un milieu avec une concentration significative des aérosols (milieux désertiques), et donc pour toute CST placée dans un environnement avec des concentrations en aérosols élevées. La nécessité de la prise en compte des gains environnementaux dépend de la concentration des aérosols dans l'atmosphère et donc du lieu de construction de la CST. Une observation au préalable des paramètres atmosphériques (instruments de télédétection ou satellites) est ainsi à effectuer pour déterminer la nécessité ou non de considérer ces gains pour une correcte estimation du flux réel collecté.

Même si cette caractéristique n'a pas été exploitée dans cette thèse, la nouvelle version du code de TRA Monte-Carlo permet aussi d'estimer de manière plus réaliste la distribution spatiale du flux collecté à la surface du récepteur avec l'ajout de la distribution des gains environnementaux. La représentation réaliste de cette distribution à la surface du récepteur est importante pour les études qui se focalisent sur l'énergie thermique collectée et perdue selon le type de récepteur, et ainsi pour l'estimation plus réaliste et précise de la production électrique.

L'outil développé est complet car il permet d'estimer comme les codes de ray tracing les composantes de l'efficacité optique (efficacité cosinus, d'ombrage, blocage, etc., présentées dans le chapitre 4) avec une meilleure précision pour le calcul de l'efficacité atmosphérique (composantes utiles à l'optimisation géométrique de la centrale). L'efficacité atmosphérique qui correspond à la transmittance du champ d'héliostats jusqu'au récepteur peut être calculé avec notre outil en considérant la variabilité atmosphérique, là où certains codes de ray tracing comportent des modèles indépendants des aérosols. A la fin du chapitre 5, nous avons calculé en plus des gains environnementaux également l'efficacité atmosphérique tout aussi significative et qui représente en moyenne pour l'année 2014 annuellement 0.9755 (soit une perte d'environ 0,95 MW). Plusieurs études sont menées depuis les années 1970 jusqu'à aujourd'hui pour donner une approximation précise de la seule composante qu'est l'efficacité atmosphérique [60]. Nous avons alors voulu estimer

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

le biais d'une des approches approximatifs les plus précises, à savoir l'approche de Elias et al. [90] validé récemment par des mesures in situ [105], en la comparant avec l'estimation plus réaliste effectuée avec notre outil. Les résultats très similaires valide la méthode simplifiée et plus rapide de Elias et al. [90]. Cependant l'utilisation de cette approche seule ne permet d'obtenir qu'une approximation de l'efficacité atmosphérique, sans les autres composantes de l'efficacité optique et sans les gains environnementaux.

Pistes d'améliorations et perspectives

Les implémentations effectuées dans SMART-G permettent la simulation précise du flux collecté par une centrale solaire à tour en considérant une atmosphère réaliste. Le code est déjà parfaitement exploitable. Et pour plus d'efficacité, d'autres développements pourront être réalisés dans le futur :

- Le code SMART-G est l'un des codes de TRA Monte-Carlo existant les plus rapides grâce à l'utilisation des GPU. Néanmoins, le temps de calcul des 8556 simulations effectuées avec SMART-G pour estimer le flux réellement collecté (flux direct collecté + gains environnementaux) durant une année complète (voir chapitre 5) est de l'ordre de 1 à 2 jours de calculs (avec une carte graphique actuelle de 500 euros). Les calculs sont réalisables mais restent néanmoins longs pour des études de sensibilité systématiques. Pour plus de souplesse, ce temps de calcul pourra être réduit avec une optimisation des tests d'intersection entre rayonnement solaire et objets 3D, mais également en adaptant les modes de lancement des photons développés (voir chapitre 3) avec la méthode de "l'estimation locale" souvent utilisée dans les codes de Monte-Carlo. Cette méthode permet de calculer la contribution des photons à chaque interaction et permet donc à la simulation de converger plus rapidement.
- La méthode présentée pour incorporer la CST dans le code SMART-G n'est valable que pour une atmosphère plan-parallèle. La non prise en compte de

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

la sphéricité de la terre engendre un problème bien connu d'estimation de flux biaisée à partir des angles zénithaux solaires supérieurs à 70 degrés. Le code SMART-G permet des calculs en géométrie sphérique. Ce problème pourra donc être résolu en adaptant la méthode développée à ce système de coordonnées.

- Le code SMART-G prend en compte l'angle solide solaire (important pour une représentation réaliste de la distribution du flux à la surface du récepteur), cependant un modèle de limb darkening devra également être implémenté pour tenir compte de la variabilité spatiale et spectrale à l'intérieur du disque solaire. Des études pourront être menées par la suite pour déterminer l'impact de ces nouvelles spécificités du disque solaire sur le flux collecté et sa distribution.
- Actuellement, le code permet l'étude d'une CST avec un récepteur de type cavité (rectangulaire). Pour étudier les CST avec un récepteur cylindrique (généralement le cas des centrales de 50 MW et plus), quelques développements mineurs seront nécessaires pour la prise compte de plusieurs récepteurs rectangulaires et ainsi former le récepteur cylindrique.

Dans ces travaux, l'utilisation du nouveau code s'est limitée à une centrale dans un lieu donnée. Cependant l'outil créé est très flexible et permettra d'effectuer des études intéressantes. Comme l'étude de la sensibilité du flux collecté aux caractéristiques de différents projets de CST (la configuration de la centrale peut être facilement modifiée) mais aussi aux propriétés de l'atmosphère avec par exemple l'altitude de répartition des aérosols (quelques tests ont montré une forte sensibilité des transmittances et des gains environnementaux), au type d'aérosols, etc. L'usage de ce nouvel outil ne s'arrête pas seulement à l'étude des CST, il ouvre la porte à plusieurs futures études qui peuvent comprendre l'analyse du flux collecté par les centrales photovoltaïques (PV) bifaciales, où la réflexion du sol et le rayonnement diffus jouent un rôle important, mais aussi l'analyse de la distribution spectrale du flux collecté (important pour le choix du matériau pour les centrales PV), etc.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

Annexe A

First Results to Evaluate Losses and Gains in Solar Radiation Collected by Solar Tower Plants

L'article présenté dans cet annexe a été soumis et accepté à l'issue de la conférence SolarPaces de 2018 (<https://2018.solarpaces-conference.org/home.html>). La référence est : [82].

Mustapha Moulana, Thierry Elias, Céline Cornet and Didier Ramon

Accurate computation of Solar Tower Plants (STPs) accounting for the atmospheric scattering gain and loss is nowadays possible with new technologies (computation performance growth). Radiative Transfer (RT) codes can be improved to perform directly and complete optical simulation of incident solar radiation in STPs. In this work, the RT SMART-G code, enabling fast computation thanks to GPU technology, have been improved to enables interactions between solar radiation and objects. Considering all the possible optical paths, a classification of the solar beams received by STPs is presented. The preliminary results obtained with a simplified STP, show that the gains due to atmospheric contribution at STPs receiver with an average horizontal heliostat-receiver distance from 200 to

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

900 meters is between 0.7% to more than 5%, depending on the aerosol optical thickness. The studied system is currently a simplified STP of maximum eight heliostats, but it is a promising way for other studies with more realistic STP and different illumination conditions

Contents

A.1 INTRODUCTION	145
A.2 METHOD	146
A.2.1 The SMART-G Simulation Tool	146
A.2.2 Solar Beams Incident at the Receiver Classified in Several Categories (Theoretical Background)	147
A.2.3 Optical Losses & Gains	148
A.2.4 Simulations Description	149
A.3 RESULTS AND DISCUSSION	152
A.4 CONCLUSION	155

A.1 INTRODUCTION

Solar Tower Plants (STPs) efficiency prediction or validation needs an accurate solar resource assessment, which is a difficult task as large variations of atmospheric parameters lead to a large variation of the solar resource. STPs simulation by considering all these variabilities requires huge performance in computation. Studies concerning the estimation of the solar resource is thus generally separated in two parts. The first part consists to get the solar radiation incoming at heliostats, using based-ground observations or Radiative Transfer (RT) codes to estimate the Direct Normal Irradiance (DNI). The second part, using the DNI as an input parameter, consists to simulate the propagation of the solar radiation in the slant path between heliostats and the receiver using Optical Simulations (OS) codes as DELSOL3, MIRVAL, HELIOS [51, 50, 12], or more recently SOLFAST, SolTRACE, Tonatiuh [53, 54, 56]. These codes have limitations, DELSOL3 for example, consider the atmospheric attenuation as only dependent on the slant path distance [59]. Whereas several studies have recently proven that the atmospheric attenuation efficiency (called the Slant Path Transmittance) is also greatly dependent on the atmospheric parameters [36, 35]. Currently, to our knowledge, [36, 35] give the most accurate estimates of the atmospheric attenuation, but scattered beams are only considered as a loss, while it may represent a potential gain. Blanc et al. [61] mention these gains in the circumsolar region, corresponding to the forward scattering of sunlight by cloud or aerosol particles, but only for the DNI estimation. Some OS codes use the model of Buie et Monger [106] to approximate, in the slant path, the distribution of scattered beams. However, this model gives only the approximation of the distribution and not on the gains contribution. To consider the contribution of gains and provide better estimates of the solar resource, the propagation of solar radiation can be simulated from the sun to directly the receiver by using RT codes. The main limitation of such simulation is the huge computational time. However, with the exponential increase of Graphic Power Unit (GPU) performance, such an ambition is now possible. In addition of considering the gain contribution, this direct simulation of the collected solar

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

resource offers the advantage of conserving the same atmospheric input data (in situ or/and satellite data) and uncertainties as for the RT codes estimates of DNI. There is for example no addition of uncertainties of independent studies for the atmospheric loss estimates. The interest of such a model is shown in this paper. We use the parallelized RT SMART-G code enabling the estimates of the incident intensity also directly at STPs receiver. The optical losses [22] are automatically considered in SMART-G and we focus on the gain contribution at the receiver. The simplified system used (STP of maximum eight heliostats) enables to have an order of gain contribution from small SPT to larger SPTs, with an average horizontal heliostat-receiver distance D_{hr} respectively from 200 to 900 meters. The atmosphere is defined from observation measurements.

In the method section, we firstly present the radiative transfer model used to conducts the studies, afterwards the classification used for the receiver incident intensity, then the definition of optical losses and gains, and finally the description of the performed simulations with modeling, technical parameters, location parameters, etc.

A.2 METHOD

A.2.1 The SMART-G Simulation Tool

Speed-Up Monte-Carlo Advanced Radiative Transfer code with GPU (SMART-G) [16] is the chosen tool to perform this study, this is a polarized Monte Carlo RT code. It enables to simulate the propagation of the light in both the atmosphere and the ocean. The solar beams can be absorbed and scattered by the atmosphere components as molecules, aerosols and droplets, and also reflected by the ground. SMART-G has been improved to allow the interactions of solar beams with objects (i.e. heliostats, receiver...). The information of each solar beam from start to end of their travel are available, allowing the estimation of losses and gains of the incident intensity at the receiver.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

A.2.2 Solar Beams Incident at the Receiver Classified in Several Categories (Theoretical Background)

Figure A.1 gives a schematic view of three solar beams incoming at the receiver from three radiative processes responsible to a trajectory modification. The first process is the Atmospheric scattering (A), the second process the reflection by a Heliostat (H) and the last process the reflection by an element of the Environment (E) as the ground, building, vegetation, etc. As shown in Fig. A.1, the solar beams incident at the receiver can be separated in several pieces. In this study we have chosen to divide them in eight categories following the three radiative processes outlined above (see Tab. A.1). The abbreviation AA in Tab. A.1, for instance, means two interactions with only the process of Atmospheric scattering as shown in Fig. A.1 with the grey dot-dashed line. The abbreviation D (for direct) refers to the case where the solar beam reaches the receiver without any processes.

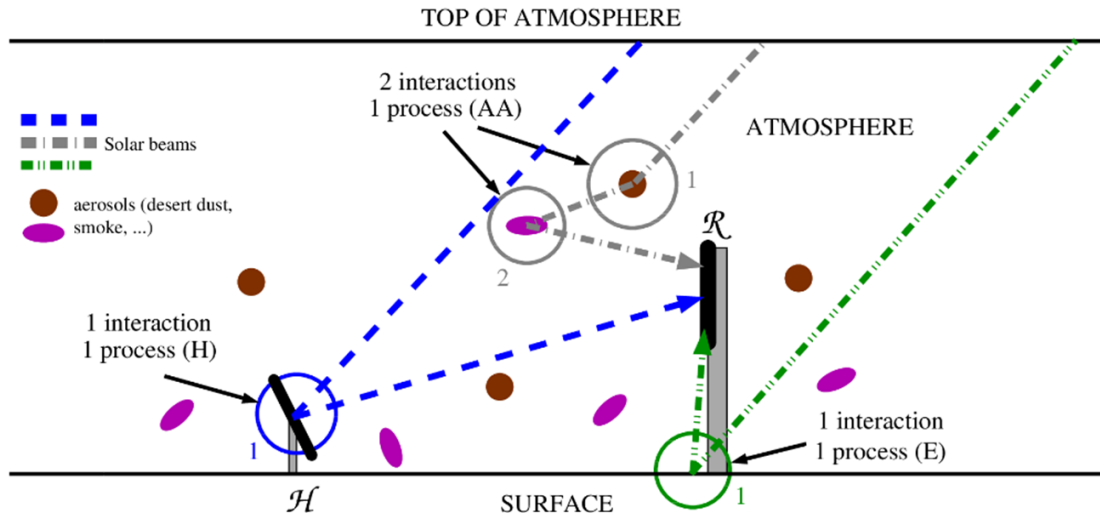


FIGURE A.1 – Schematic of three beams reaching the receiver $\mathcal{R}$ from three different paths. One path where the beam (blue dashed line) gets one interaction from the process of heliostats reflection (reflected by the heliostat $\mathcal{H}$), the second beam (green two dot-dashed line) gets also one interaction but from the process of environment reflection (here the ground), and the last beam (grey dot-dashed line) get two interactions, both from the process of atmospheric scattering.

TABLE A.1 – Solar beams from all the possible optical paths, classified with three radiative processes in eight categories. Only possible paths from one to three interactions are given, but the classification is valid for any number of interactions. The category colors are helpful for the Fig. A.1, 4 and 5.

	Number of Processes	Which Process(es)	Possible Paths from 1 to 3 Interactions
Cat.1	0	without any processes	D
Cat.2	1	Helio stat reflection (H)	H, HH, HHH
Cat.3	1	Envi ron ment reflection (E)	E, EE, EEE
Cat.4	1	Atmosphere scattering (A)	A, AA, AAA
Cat.5	2	H and A	HA, AH, AAH, AHA, AHH, HHA, HAH, HAA
Cat.6	2	H and E	HE, EH, HHE, HEH, HEE, EEH, EHE, EHH
Cat.7	2	E and A	EA, AE, AAE, AEA, AEE, EEA, EAE, EAA
Cat.8	3	H and E and A	AHE, AEH, HAE, HEA, EAH, EHA

A.2.3 Optical Losses & Gains

Heliostat field performance of STPs is defined by the optical efficiency, noted η_{opt} , following this equation [107] :

$$\eta_{opt} = \frac{P_{field}}{A_{field} I_s} \quad (A.1)$$

In Eq. (A.1), A_{field} corresponds to the total of the heliostat field surface (m^2), I_s the DNI (W/m^2) and P_{field} the power intercepted by the receiver (W). This efficiency depends on different types of optical losses defined by Li et al [22] : 1) the cosine effect, referring to the loss due to the tilt angle between the heliostat surface normal compared to the incident beam, 2) the spillage loss, representing the beams missing the receiver due to the heliostat roughness surface, heliostat misalignment and small receiver aperture, 3) the attenuation loss which is the atmospheric extinction loss between the heliostat and the receiver, 4) the reflection loss which concerns the heliostat reflectivity loss, affected for instance by the heliostat soiling, 5) the shadows loss which is due the shadows created by another heliostat, the tower, the receiver, etc. and 6) the blocking loss which designates the loss after heliostats reflection due to an obstacle as a second heliostat.

According to other authors, we define Pfield (in Eq. (A.1)) as the power inter-

cepted by the receiver of solar beams incident with only the process of heliostat reflection (corresponding to Cat.2 in Tab. A.1). That is why the power of the other incident solar beams (corresponding to solar beams from all the categories except Cat.2) are considered as gains.

A.2.4 Simulations Description

In this study, we are interested in the gain contribution and since a part of gains comes from the atmospheric scattering, an area where solar radiation can be highly scattered is preferred. We have chosen to take an atmospheric profile corresponding to the Noor III STP location, where there is a huge variation of desert aerosols. The AFGL midlatitude summer profile [108] has been chosen and proportionally modified to allow a surface pressure of 877 hPa (altitude of Noor III), water vapor values were also modified to fill 1.2 g/cm² (AERONET average observation at Ouarzazate summer [102]). A desert spheroid aerosols OPAC profile has been chosen [103]. According to the Noor III location measurements, the average Aerosol Optical Thickness (AOT) in summer is usually 0.4 and can also reach a value of 1 (daily resolution) [102]. For the simulations the choice of AOT values are then : 0.25, 0.5, 0.75 and 1.

We start in this paper with preliminary computations of simple systems composed of a receiver and a maximum of eight heliostats (variation of the number of heliostats : 1, 2, 4 and 8). Because of a lack of information for Noor III and for more simplicity, the receiver and heliostats modeling has been inspired by the PS10 STP [97, 88]. For instance, the PS10 receiver is inside a cavity which can be assimilated by a simple rectangular form. The chosen parameters are summarized in Tab. A.2.

TABLE A.2 – Receiver and heliostat characteristics

Heliostat	Reflectivity []	0.88
	Width [m]	12.84
	Height [m]	9.45
	Pillar Height [m]	5.17
Receiver	Height of receiver middle [m] []	106.5
	Inclination angle [°]	11.5
	Width [m]	14
	Height [m]	12

Figure A.2 shows a schematic of our simulations (case with 4 heliostats). The increase of the number of heliostats is done along a straight line (North-South). The first heliostat is at 200 meters (horizontally) from the receiver, and each added heliostat is further than the previous one of 200 meters. This gap allows to avoid as much as possible the shadows and blocking losses. The maximum horizontal heliostat-receiver distance is 1.6 kilometers (case for simulations with 8 heliostats), this is in average the maximum horizontal receiver-heliostat distance of huge STPs as Noor III and Crescent Dunes. The sun is behind the receiver (the receiver faces North and is in shadows) and the zenith angle is equal to 14.3° , corresponding to the noon position at Ouarzazate, Morocco.

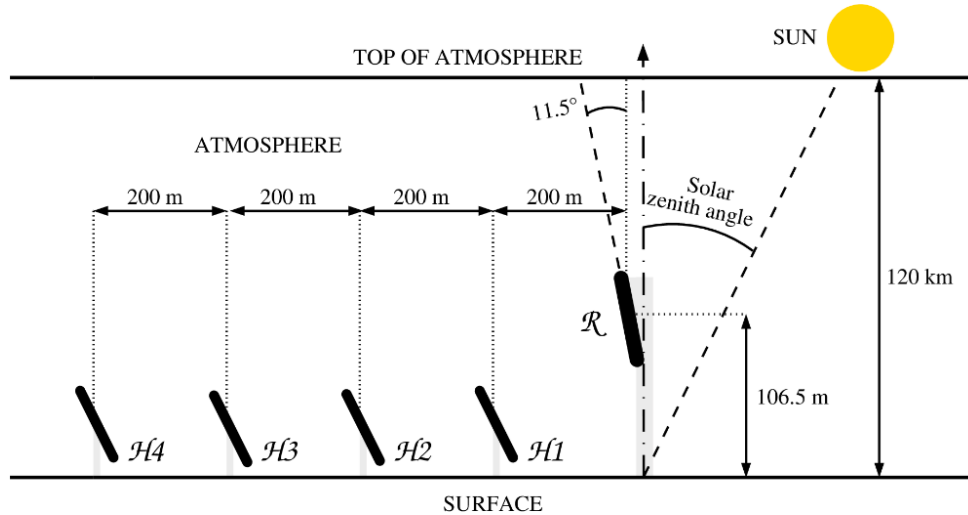


FIGURE A.2 – Schematic description of the position of the receiver R and the heliostats H1, H2, H3 and H4.

Figure A.3 shows the intensity variation of all the solar beams incident at the receiver except the direct solar beams and the solar beams incident with only the process of heliostat reflection (i.e. solar beams from all the categories except from Cat.1 and 2 in Tab. A.1) in function of the size of the surface where they are distributed at Top Of Atmosphere (TOA). A square surface at TOA is used as the input of solar beams to consider the influence of solar beams from Cat.3, 4, 5, 6 and 7. The horizontal position of this square zone depends of the sun zenith angle and of the receiver position. Such as the center of the surface produced by the direct solar beams reaching the ground is coincident with the horizontal position of the receiver. More the square surface at TOA is large more the atmosphere influence is accurately considered, but also a larger number of solar beams is needed. Then to define an optimum minimal size, we performed different simulations with one heliostat at 200 meters horizontally from the receiver by varying the size of the square surface from 1 km² to almost 9000 km². For a size of approximately 2000 km² a stabilization is observed in Fig. A.3. The square surface size is thus set to 45 x 45 km².

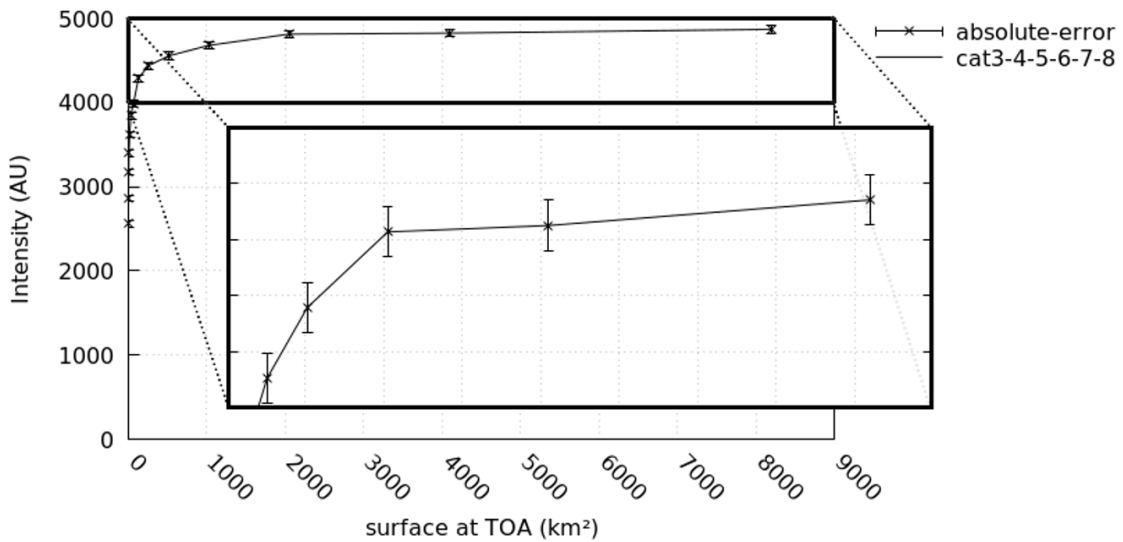


FIGURE A.3 – Sum of receiver incident intensities (Arbitrary Unit) of solar beams from Cat.3, 4, 5, 6, 7 and 8 (vertical axis) in function of the size of the square zone at TOA (horizontal axis).

By accounting the variation of AOT values and the number of heliostats, there are sixteen simulations. The simulations are performed with 200 billion of beams from TOA in a plan-parallel atmosphere for monochromatic radiation at a wavelength of 550 nm, which is usually taken as reference [35]. The ground is considered as a plane Lambertian surface with an albedo of 0.25, this is approximately the spectral average surface albedo of a stone-desert surface in many parts of the Ouarzazate basin [109]. The attenuation, the cosine and reflectivity losses are taken into account, the shadow and blocking losses are supposed to be negligible and there is an absence of surface roughness at the heliostats.

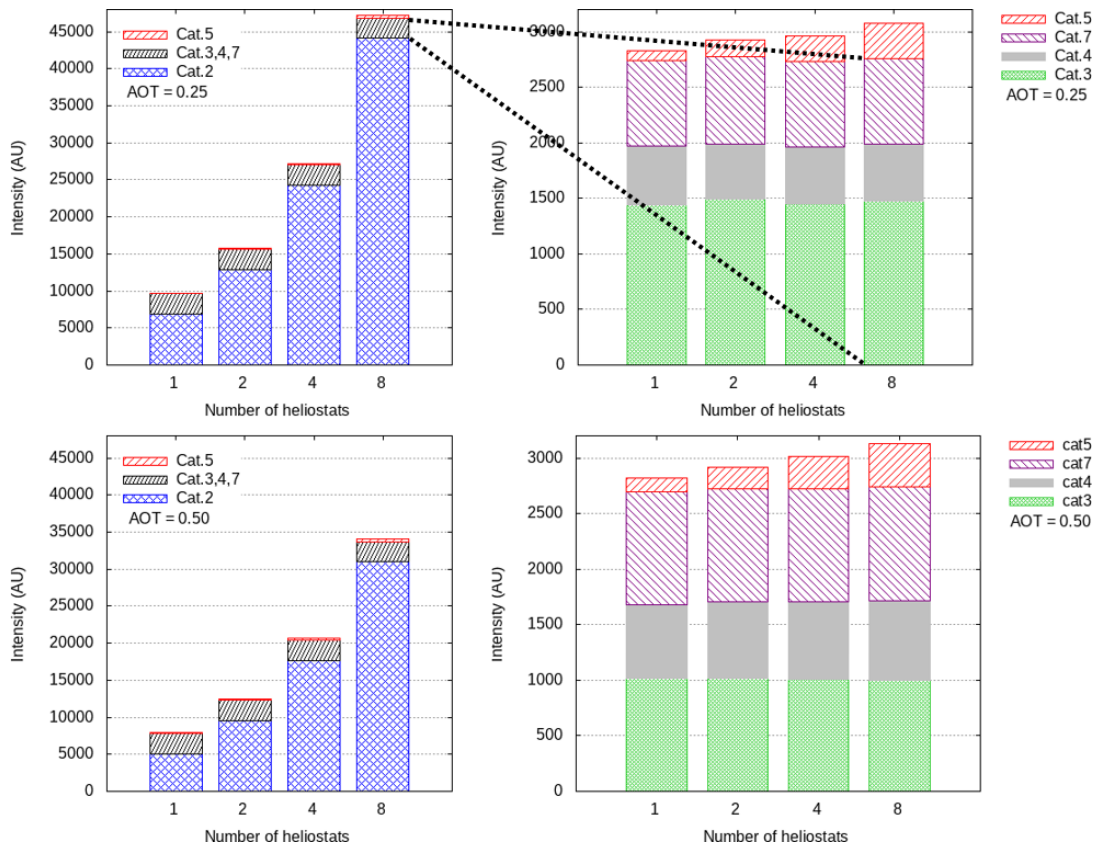
A.3 RESULTS AND DISCUSSION

Figure A.3 shows the decomposition of the total incident intensity at the receiver following the classification of Tab.1. As the sun is behind the receiver, the direct solar beams coming at the receiver without any radiative processes (Cat.1) is always null. As there is no heliostat surface roughness, as the ground is a plane surface and as heliostats are oriented to reflect all the direct beams to the receiver, the case where solar beams reach the receiver with only the two processes of heliostat reflection and environment reflection (Cat.6) is not possible. The computed intensity of solar beams reaching the receiver through the three radiative processes (Cat.8) is for all our simulations very close to zero. Then the solar beams from Cat.1, 6 and 8 are not represented.

Figure A.3 (first column) shows the intensities of solar beams reaching the receiver with only the process of heliostat reflection (Cat.2), with only the two processes of heliostat reflection and atmospheric scattering (Cat.5), and without the heliostat reflection process (sum of Cat.3, 4 and 7). Figure A.3 (second column) gives a zoom of all these intensities except from solar beams incident with only the process of heliostat reflection (Cat.2).

In Fig. A.3, the increase of the number of heliostats (same behavior for the four AOT) leads logically to an increase of the intensity from solar beams reaching the receiver with at least a process of heliostat reflection (Cat.2 and 5). For solar

beams with at least a process of environment scattering (Cat.3 and 7), the increase of the number of heliostats create a diminution of the ground surface, so we expected a decrease of surface reflection and hence of intensity. But, the number of heliostats for these simulations is too small. The solar beams with only the atmospheric scattering process (Cat.4), is as expected independent on the number of heliostats. The increase of AOT (conducting to a scatter probability growth) leads as expected to an increase of the intensity from solar beams incident with at least an atmospheric scattering process (Cat.4 and 7), and to a decline of the intensity from solar beams incident at the receiver without the atmospheric scattering process (Cat.2 and 3).



see the next page for complete description

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

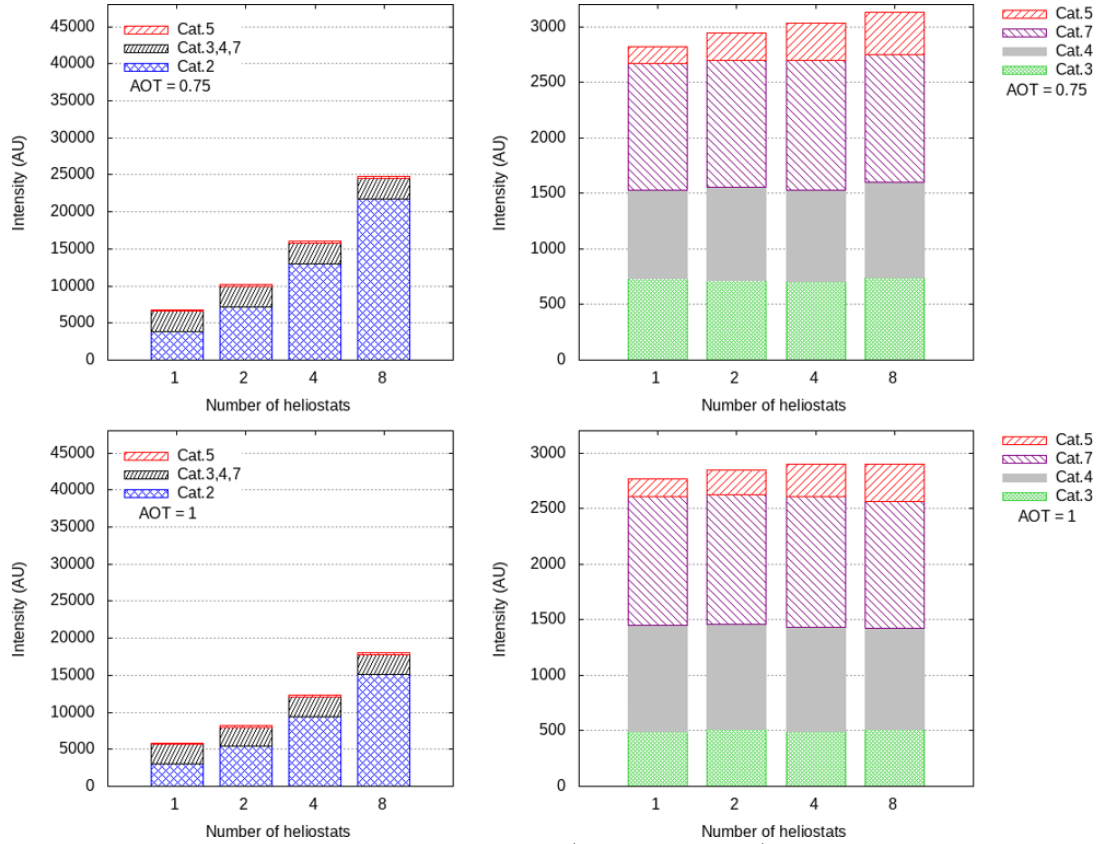


FIGURE A.3 – Receiver incident intensities (Arbitrary Unit) of solar beams from Cat.2, 3, 4, 5 and 7 for AOT of 0.25, 0.5, 0.75 and 1 in the first column. Intensities of solar beams from all the same categories except Cat.2 in the second column.

The aim is to assess the contribution of solar beams intensity of each category collected by a realistic STP. As previously commented, the intensities of solar beams from Cat.3, 4 and 7 do not vary or must decrease with the number of heliostats, and then in a realistic STP their contributions will become negligible. The only remaining contributions are from solar beams classified by Cat.2 and 5. In Eq.1 we have previously defined Pfield (reference for losses and gains) as the power of solar beams incident with only the process of heliostat reflection (Cat.2). Figure 5 shows then the gain contribution of Cat.5 intensity, which represents combination of atmospheric scattering and heliostat reflection processes, compared to Cat.2 intensity. Figure 5 shows that relatively to Cat.2, Cat.5 contribution is increasing by AOT (due to a large decrease of Cat.2). However, this contribution

decreases by increasing the D_{hr} value. This is logical because there is no loss due to beams missing the receiver from Cat2 (no consideration of heliostat surface roughness). For the solar beams of Cat.5 (incorporating the forward scattered beams) there are losses because the aperture of solar beams reaching the receiver increases with the D_{hr} .

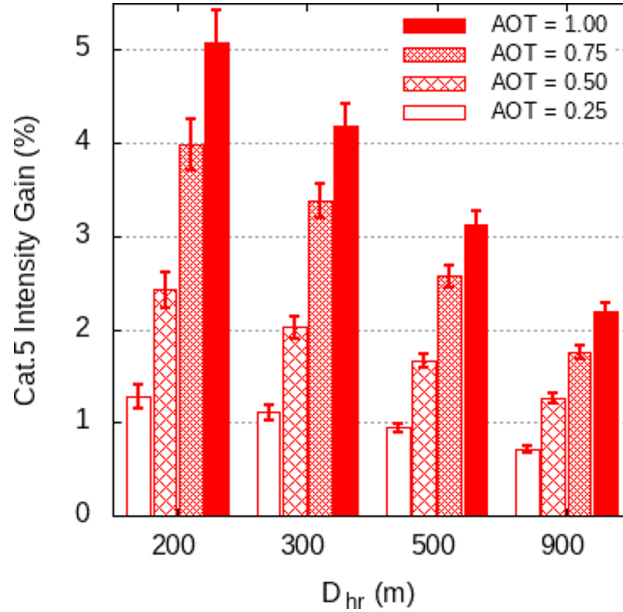


FIGURE A.4 – Percentage of gain from Cat.5 intensity relatively to Cat.2 intensity (reference for gains and losses) at the receiver, in function of AOT and the horizontal average heliostat-receiver distance (D_{hr}).

A.4 CONCLUSION

This study presents preliminary results towards the accurate computation of the solar radiation incident intensity at the receiver of a STP. Several simulations have been performed to study the sensibility of three parameters, the number of heliostats, the D_{hr} and AOT. Currently, the STP used for the simulations is composed of maximum eight heliostats with no surface roughness, and with an environment comprising a desert-stone plane ground. Following these conditions, the intensities of solar beams incident at the receiver with only the two processes

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

of heliostat reflection and environment (here the ground) reflection, and with all the three radiative processes at the same time are equal or very close to zero (solar beams from Cat.6 and 8 in Tab. A.1). The only contributions, which is increasing with the number of heliostats, correspond to intensities from solar beams incident with only the heliostat reflection process and to solar beams incident with the combination of the two processes of atmospheric scattering and heliostat reflection (respectively solar beams from Cat.2 and 5 in Tab. A.1). The main contribution, used as reference for losses and gains, is as expected the intensity of solar beams incident with the only process of heliostat reflection (Cat.2). The other intensities of solar beams incident with only the process of environment reflection, with only the process of atmospheric scattering and with only the two processes of environment reflection and atmospheric scattering (solar beams from Cat.3, 4 and 7 in Tab. A.1) are as predicted independent on the number of heliostats. They will then be negligible for STP with hundreds of heliostats. For huge STP, with a D_{hr} of 900 meters, the gain contribution is then equal to 0.71% for an AOT of 0.25 and can reach 2.2% for an AOT of 1. For a small STP, with a D_{hr} of 200 meters, this gain contribution is equal to 1.28% for an AOT of 0.25 but can reach 5.08% for an AOT of 1. We observe at the receiver the same order of gain contribution than [61] at heliostats with DNI. The results are expected to be different for other configurations. For example, a higher receiver as the Crescent Dunes STP receiver, will certainly increase the gain contribution from Cat.5 because of a larger receiver aperture. The gains may also increase for larger zenith angles. In addition, a lot of parameters have been neglected, for instance the blocking and shadows losses. The consideration of these parameters can lead to different conclusions and then deserve to be analyzed. Additionally, an implementation of a disk sun source with consideration of the sun solid angle for a more accurate sunshape as Reinhard [110] is planned in SMART-G. Once all these improvements would have been implemented in SMART-G, simulations for a complete STP for the whole solar spectral range will be realized to obtain more realistic computed powers.

Bibliographie

- [1] IEA. Data and statistics. <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TPESbySource>, 2020. International Energy Agency ; Total energy supply (TES) by source.
- [2] Ritchie Hannah. Sector by sector : where do global greenhouse gas emissions come from ? <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>, 2020. Published online at Our-WorldInData.org ; [Online Resource].
- [3] GIEC. Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf, 2014.
- [4] Eduardo von Sperling. Hydropower in brazil : Overview of positive and negative environmental aspects. *Energy Procedia*, 18 :110 – 118, 2012. ISSN 1876-6102. doi : <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.023>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021200793X>. Terragreen 2012 : Clean Energy Solutions for Sustainable Environment (CESSE).
- [5] Bloomberg Energy Finance. New energy outlook 2020. <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>, 2020.
- [6] BP. Energy outlook 2020 edition. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf>, 2020.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

- [7] Agence internationale de l'énergie. *World Energy Outlook 2020*. Éditions OCDE, 2020. doi : <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/557a761b-en>. URL <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/557a761b-en>.
- [8] Royal Dutch Shell. New lens scenarios. a shift in perspective for a world in transition, 2013.
- [9] DESERTEC. Clean power from deserts, 2009. the DESERTEC Concept for energy, water and Climate security ; WhiteBook 4th edition.
- [10] Deign Jason. America's concentrated solar power companies have all but disappeared. <https://www.greentechmedia.com/articles/read/americas-concentrated-solar-power-companies-have-all-but-disappeared>, 2020. Published online at greentechmedia.com ; [Online Resource].
- [11] Fariñas Ivan Pardo. El cierre de solarreserve, un caso aislado de la industria termosolar. <http://helionoticias.es/el-cierre-de-solarreserve-un-caso-aislado-de-la-industria-termosolar/>, 2020. Published online at helionoticias.es ; [Online Resource].
- [12] F. Biggs and C. N. Vittitoe. HELIOS : A computational model for solar concentrators. *NASA STI/Recon Technical Report N*, 78, 1977.
- [13] Cyril Caliot, Hadrien Benoit, Emmanuel Guillot, Jean-Louis Sans, Alain Ferriere, Gilles Flamant, Christophe Coustet, and Benjamin Piaud. Validation of a monte carlo integral formulation applied to solar facility simulations and use of sensitivities. *Journal of Solar Energy Engineering*, 137(2), 2015.
- [14] Christian A. Gueymard. The smarts spectral irradiance model after 25 years : New developments and validation of reference spectra. *Solar Energy*, 187 :233 – 253, 2019. ISSN 0038-092X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.048>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X19305110>.

- [15] Gabriel López, Christian A. Gueymard, Juan Luis Bosch, Igor Rapp-Arrarás, Joaquín Alonso-Montesinos, Inmaculada Pulido-Calvo, Jesús Bal-lestrín, Jesús Polo, and Javier Barbero. Modeling water vapor impacts on the solar irradiance reaching the receiver of a solar tower plant by means of artificial neural networks. *Solar Energy*, 169 :34 – 39, 2018. ISSN 0038-092X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.023>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18303682>.
- [16] Didier Ramon, François Steinmetz, Dominique Jolivet, Mathieu Compiègne, and Robert Frouin. Modeling polarized radiative transfer in the ocean-atmosphere system with the gpu-accelerated smart-g monte carlo code. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 222 :89–107, 2019.
- [17] Robert SOLER. Le solaire thermodynamique à concentration : le solaire au zénith. Une technologie dévoilée, EDF R&D. <https://www.edf.fr/sites/default/files/Lot%203/CHERCHEURS/Publications/technologie devoilee01internet.pdf>, 2012.
- [18] Huseyin Murat Cekirge and Ammar Elhassan. A comparison of solar power systems (csp) : solar tower (st) systems versus parabolic trough (pt) systems. *American Journal of Energy Engineering*, 3(3) :29–36, 2015.
- [19] Ministère de la transition écologique. Sécurité d’approvisionnement en électricité. <https://www.ecologie.gouv.fr/securite-dapprovisionnement-en-electricite>, 2020.
- [20] Syndicat des énergies renouvelables. Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique, 2012.
- [21] Germain Baud. *Conception de récepteurs solaires à lit fluidisé sous flux radiatif concentré*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2011.
- [22] Lifeng Li, Joe Coventry, Roman Bader, John Pye, and Wojciech Lipiński. Optics of solar central receiver systems : a review. *Opt. Express*, 24(14) :

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

- A985–A1007, Jul 2016. doi : 10.1364/OE.24.00A985. URL <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-24-14-A985>.
- [23] Supcon delingha 10mw tower description. <http://www.supconsolar.com/en/cases/detail/id/10.html>, Accessed : 2020.
- [24] Supcon delingha 50mw tower description. <http://www.supconsolar.com/en/cases/detail/id/11.html>, Accessed : 2020.
- [25] SolarPACES and National Renewable Energy Laboratory (NREL). Concentrating solar power projects. <https://solarpaces.nrel.gov/>, Accessed : 2020.
- [26] Qinghai gonghe 50mw csp plant description. <http://www.supconsolar.com/en/cases/detail/id/12.html>, Accessed : 2020.
- [27] Alexandra Papadopoulou, George Vasileiou, Serafeim Michas, and Alexandros Flamos. Current project structures and financing opportunities for csp projects. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf, 2019.
- [28] Gwen Bender, Francesca Davidson, Scott Eichelberger, and Christian A Gueymard. The road to bankability : improving assessments for more accurate financial planning. In *Solar 2011 Conference Proceedings*, pages 16–21, 2011.
- [29] Frank Vignola, Cathy Grover, Nick Lemon, and Andrew McMahan. Building a bankable solar radiation dataset. *Solar Energy*, 86(8) :2218 – 2229, 2012. ISSN 0038-092X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.013>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1200182X>. Progress in Solar Energy 3.
- [30] Philippe Blanc, CA Gueymard, Richard Meyer, and Dave Renne. Improving dni information for csp development, 2013.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

- [31] Tobias Hirsch, J Dersch, T Fluri, J Garcia-Barberena, S Giuliano, F Hustig-Diethelm, R Meyer, N Schmidt, M Seitz, and M Eck. Solarpaces guideline for bankable ste yield assessment. *IEA Technology Collaboration Programme SolarPACES*, 2017.
- [32] Edgar FM Abreu, Paulo Canhoto, and Maria João Costa. Circumsolar irradiance modelling using libradtran and aeronet data. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2126, page 190001. AIP Publishing LLC, 2019.
- [33] Jesús Ballestrín and Aitor Marzo. Solar radiation attenuation in solar tower plants. *Solar Energy*, 86(1) :388 – 392, 2012. ISSN 0038-092X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.10.010>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1100377X>.
- [34] Jesús Polo, Jesús Ballestrín, and Elena Carra. Sensitivity study for modelling atmospheric attenuation of solar radiation with radiative transfer models and the impact in solar tower plant production. *Solar Energy*, 134 : 219 – 227, 2016. ISSN 0038-092X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.04.050>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16300974>.
- [35] Thierry Elias, Didier Ramon, Laurent Dubus, Charles Bourdil, Emilio Cuevas-Agulló, Taoufik Zaidouni, and Paola Formenti. Aerosols attenuating the solar radiation collected by solar tower plants : The horizontal pathway at surface level. In *AIP Conference Proceedings*, volume 150004, 2016.
- [36] Natalie Hanrieder, Stefan Wilbert, Robert Pitz-Paal, Claudia Emde, Josef Gasteiger, Bernhard Mayer, and Jesus Polo. Atmospheric extinction in solar tower plants : absorption and broadband correction for mor measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(8) :3467–3480, 2015.
- [37] Xiuhong Chen and Heli Wei. A combined atmospheric radiative transfer model (cart) : a review and applications. *Journal of the Optical Society of Korea*, 14(3) :190–198, 2010.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

- [38] Yu Xie, Manajit Sengupta, and Jimy Dudhia. A fast all-sky radiation model for solar applications (farms) : Algorithm and performance evaluation. *Solar Energy*, 135 :435–445, 2016.
- [39] Phillipe Dubuisson. Les codes numériques pour la simulation du transfert radiatif atmosphérique. In *Transfert Radiatif dans les ATmosphères Terrestres pour les ObseRvations spAcIAles*, pages 1–13. Trattoria, 2015.
- [40] Bernhard Mayer. Radiative transfer in the cloudy atmosphere. In *EPJ Web of Conferences*, volume 1, pages 75–99. EDP Sciences, 2009.
- [41] Zhen Wang, Shengcheng Cui, Jun Yang, Haiyang Gao, Chao Liu, and Zhibo Zhang. A novel hybrid scattering order-dependent variance reduction method for monte carlo simulations of radiative transfer in cloudy atmosphere. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 189 : 283–302, 2017. ISSN 0022-4073. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.12.002>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407316304265>.
- [42] D. J. Zawada, S. R. Dueck, L. A. Rieger, A. E. Bourassa, N. D. Lloyd, and D. A. Degenstein. High-resolution and monte carlo additions to the sasktran radiative transfer model. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8 (6) :2609–2623, 2015. doi : 10.5194/amt-8-2609-2015. URL <https://amt.copernicus.org/articles/8/2609/2015/>.
- [43] C Cornet, L C-Labonnote, and F Szczap. Three-dimensional polarized monte carlo atmospheric radiative transfer model (3dmcpol) : 3d effects on polarized visible reflectances of a cirrus cloud. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 111(1) :174–186, 2010.
- [44] Vasileios Barlakas, Andreas Macke, and Manfred Wendisch. Sparta-solver for polarized atmospheric radiative transfer applications : Introduction and application to saharan dust fields. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 178 :77–92, 2016.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

- [45] Claudia Emde, Vasileios Barlakas, Céline Cornet, Frank Evans, Sergey Korkin, Yoshifumi Ota, Laurent C Labonnote, Alexei Lyapustin, Andreas Macke, Bernhard Mayer, et al. Iprt polarized radiative transfer model intercomparison project—phase a. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 164 :8–36, 2015.
- [46] Claudia Emde, Vasileios Barlakas, Céline Cornet, Frank Evans, Zhen Wang, Laurent C. Labonotte, Andreas Macke, Bernhard Mayer, and Manfred Wendisch. Iprt polarized radiative transfer model intercomparison project – three-dimensional test cases (phase b). *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 209 :19 – 44, 2018. ISSN 0022-4073. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.01.024>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407317308981>.
- [47] Didier Ramon, François Steinmetz, Dominique Jolivet, Mathieu Compiègne, Bruno Monsterlet, and Laurent Wandrebeck. Ocean-atmosphere monte-carlo polarized radiative transfer on gpu with smart-g. *Not yet published*, 201X.
- [48] J. Gasteiger, C. Emde, B. Mayer, R. Buras, S.A. Buehler, and O. Lemke. Representative wavelengths absorption parameterization applied to satellite channels and spectral bands. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 148 :99–115, 2014. ISSN 0022-4073. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.06.024>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407314002842>.
- [49] Seiji Kato, Thomas P Ackerman, James H Mather, and Eugene E Clothiaux. The k-distribution method and correlated-k approximation for a shortwave radiative transfer model. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 62(1) :109–121, 1999.
- [50] P L Leary and J D Hankins. User’s guide for mirval : a computer code for

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

- comparing designs of heliostat-receiver optics for central receiver solar power plants. *Workshop on Solar Energy Appl.*, 2 1979. doi : 10.2172/6371450.
- [51] T.A. Dellin and M.J. Fish. User's manual for delsol : a computer code for calculating the optical performance, field layout, and optimal system design for solar central receiver plants. *Sandia Labs., Livermore, CA*, 6 1979.
- [52] Pierre Garcia, Alain Ferriere, and Jean-Jacques Beziau. Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications : A comparative review. *Solar Energy*, 82(3) :189 – 197, 2008. ISSN 0038-092X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.08.004>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X07001727>.
- [53] J P Roccia, B Piaud, C Coustet, C Caliot, E Guillot, G Flamant, and J Delatorre. Solfast, a ray-tracing monte-carlo software for solar concentrating facilities. *Journal of Physics : Conference Series*, 369(1) :012029, 2012. URL <http://stacks.iop.org/1742-6596/369/i=1/a=012029>.
- [54] Tim Wendelin. Soltrace : A new optical modeling tool for concentrating solar optics. *International Solar Energy Conference*, 2003. URL <http://dx.doi.org/10.1115/ISEC2003-44090>.
- [55] Boris Belhomme, Robert Pitz-Paal, Peter Schwarzbözl, and Steffen Ulmer. A new fast ray tracing tool for high-precision simulation of heliostat fields. *Journal of Solar Energy Engineering*, 131(3) :031002, 2009.
- [56] Manuel J Blanco. Tonatiuh : An object oriented, distributed computing, monte-carlo ray tracer for the design and simulation of solar concentrating systems, 2016.
- [57] Sebastian-James Bode and Paul Gauché. Review of optical software for use in concentrating solar power systems. In *Proceedings of South African Solar Energy Conference*, 2012.

- [58] Clifford Kuofei Ho. Software and codes for analysis of concentrating solar power technologies. Technical report, Sandia National Laboratories, 2008.
- [59] F. Rinaldi, M. Binotti, A. Giostri, and G. Manzolini. Comparison of linear and point focus collectors in solar power plants. *Energy Procedia*, 49 : 1491 – 1500, 2014. ISSN 1876-6102. doi : <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.03.158>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214006122>. Proceedings of the SolarPACES 2013 International Conference.
- [60] N. Hanrieder, S. Wilbert, D. Mancera-Guevara, R. Buck, S. Giuliano, and R. Pitz-Paal. Atmospheric extinction in solar tower plants – a review. *Solar Energy*, 152 :193 – 207, 2017. ISSN 0038-092X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.013>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17300221>. Progress in Solar Energy Special Issue : Concentrating Solar Power (CSP).
- [61] P. Blanc, B. Espinar, N. Geuder, C. Gueymard, R. Meyer, R. Pitz-Paal, B. Reinhardt, D. Renné, M. Sengupta, L. Wald, and S. Wilbert. Direct normal irradiance related definitions and applications : The circumsolar issue. *Solar Energy*, 110 :561 – 577, 2014. ISSN 0038-092X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.001>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14004824>.
- [62] Viktor Tatsiankou, Karin Hinzer, Henry Schriemer, Joan Haysom, and Richard Beal. A novel instrument for cost-effective and reliable measurement of solar spectral irradiance. In *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd*, pages 1–4. IEEE, 2015.
- [63] B. Reinhardt, R. Buras, L. Bugliaro, S. Wilbert, and B. Mayer. Determination of circumsolar radiation from meteosat second generation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(3) :823–838, 2014. doi : 10.5194/amt-7-823-2014. URL <https://www.atmos-meas-tech.net/7/823/2014/>.

- [64] Yehia Abdelmaksoud Abdalla Eissa. *Modelling the beam and circumsolar radiation under cloud-free conditions in desert environment*. Theses, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, June 2015. URL <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01168647>.
- [65] Bernhard Reinhardt. *On the retrieval of circumsolar radiation from satellite observations and weather model output*. PhD thesis, lmu, 2013.
- [66] J. Lenoble. *Atmospheric Radiative Transfer*. Adarsh Deepak. Hampton, Virginia, USA, 1993. ISBN 0-937194-21-2. URL https://books.google.fr/books/about/Atmospheric_radiative_transfer.html?id=WDBRAAAAMAAJ&redir_esc=y.
- [67] K. N. Liou. *An Introduction to Atmospheric Radiation (Second Edition)*, volume 84 of *International Geophysics Series*. Academic Press, 2002. ISBN 9780123958259. URL <https://www.elsevier.com/books/an-introduction-to-atmospheric-radiation/liou/978-0-12-451451-5>.
- [68] S. Chandrasekhar. *Radiative Transfer*. Dover Books on Intermediate and Advanced Mathematics. Dover Publications, 1960. ISBN 9780486605906. URL <https://books.google.fr/books?id=CK3HDRwCT5YC>.
- [69] H.C. Van De Hulst. *Light Scattering by Small Particles*. Dover Classics of Science and Mathematics. Dover Publications, 1981. ISBN 0-486-64228-3. URL <http://store.doverpublications.com/0486642283.html>.
- [70] William L Dunn and J Kenneth Shultis. *Exploring monte carlo methods*. Elsevier, 2011.
- [71] Nicholas Metropolis and Stanislaw Ulam. The monte carlo method. *Journal of the American statistical association*, 44(247) :335–341, 1949.
- [72] George Louis Leclerc de Buffon. Essai d’arithmétique morale. *Euvres philosophiques*, 1777.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

- [73] Asaph Hall. On an experimental determination of π . *Messeng. Math*, 2 : 113–114, 1873.
- [74] Frédéric Legrand. Calcul d'intégrales : méthode de monte-carlo. <https://www.f-legrand.fr/scidoc/docimg/numerique/montecarlo/integrales/integrales.html>, n.d.
- [75] Carl Graham and Denis Talay. *Simulation stochastique et méthodes de Monte-Carlo*. École polytechnique France, 2011.
- [76] Philip Dutré. Global illumination compendium. *Computer Graphics, Department of Computer Science, Katholieke Universiteit Leuven*, 2003.
- [77] Greg Humphreys Matt Pharr. *PHYSICALLY BASED RENDERING From theory to implementation : second edition*. Computer Graphics. Morgan Kaufmann, 2010. ISBN 9780123750792.
- [78] Claudia Emde, Robert Buras, and Bernhard Mayer. Alis : An efficient method to compute high spectral resolution polarized solar radiances using the monte carlo approach. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 112(10) :1622–1631, 2011. ISSN 0022-4073. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.03.018>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407311001373>.
- [79] GI Marchuk, GA Mikhailov, MA Nazaraliev, RA Dacbinjan, BA Kargin, and BS Elepov. Monte carlo methods in atmospheric optics. *Applied Optics*, 20, 1981.
- [80] Matt Pharr, Wenzel Jakob, and Greg Humphreys. *Physically based rendering : From theory to implementation*. Morgan Kaufmann, 2016.
- [81] Gail P Anderson, Shepard Anthony Clough, FX Kneizys, James H Chetwynd, and Eric P Shettle. Afl atmospheric constituent profiles (0.120 km). Technical report, AIR FORCE GEOPHYSICS LAB HANSCOM AFB MA, 1986.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

- [82] Mustapha Moulana, Thierry Elias, Céline Cornet, and Didier Ramon. First results to evaluate losses and gains in solar radiation collected by solar tower plants. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2126, page 190012. AIP Publishing LLC, 2019.
- [83] De la Torre Jérémie. *Calculs de sensibilités par méthode de Monte-Carlo, pour la conception de procédés à énergie solaire concentrée*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2011.
- [84] O. Farges, J.J. Bézian, H. Bru, M. El Hafi, R. Fournier, and C. Spiesser. Life-time integration using monte carlo methods when optimizing the design of concentrated solar power plants. *Solar Energy*, 113 :57 – 62, 2015. ISSN 0038-092X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.027>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14006185>.
- [85] O. Farges, J.J. Bézian, and M. El Hafi. Global optimization of solar power tower systems using a monte carlo algorithm : Application to a re-design of the ps10 solar thermal power plant. *Renewable Energy*, 119 : 345 – 353, 2018. ISSN 0960-1481. doi : <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.028>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117312247>.
- [86] G. Sassi. Some notes on shadow and blockage effects. *Solar Energy*, 31 (3) :331 – 333, 1983. ISSN 0038-092X. doi : [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(83\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(83)90022-1). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X83900221>.
- [87] Mustafa E. Elayeb, Rajab A. Haman, and Fuad M.F. Siala. Calculation of the blocking factor in heliostat fields. *Energy Procedia*, 57 :291 – 300, 2014. ISSN 1876-6102. doi : <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.034>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214014015>. 2013 ISES Solar World Congress.

- [88] F Eddhibi, M Ben Amara, M Balghouthi, and A Guizani. Optical study of solar tower power plants. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 596, page 012018. IOP Publishing, 2015.
- [89] L. García, M. Burisch, and M. Sanchez. Spillage estimation in a heliostats field for solar field optimization. *Energy Procedia*, 69 :1269 – 1276, 2015. ISSN 1876-6102. doi : <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.156>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215004622>. International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems, SolarPACES 2014.
- [90] Thierry Elias, Didier Ramon, Marie-Agnès Garnero, Laurent Dubus, and Charles Bourdil. Solar energy incident at the receiver of a solar tower plant, derived from remote sensing : Computation of both dni and slant path transmittance. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1850, page 140005. AIP Publishing, 2017.
- [91] Xiudong Wei, Zhenwu Lu, Zhifeng Wang, Weixing Yu, Hongxing Zhang, and Zhihao Yao. A new method for the design of the heliostat field layout for solar tower power plant. *Renewable Energy*, 35(9) :1970–1975, 2010.
- [92] Corey J Noone, Manuel Torrilhon, and Alexander Mitsos. Heliostat field optimization : A new computationally efficient model and biomimetic layout. *Solar Energy*, 86(2) :792–803, 2012.
- [93] Ye Wang, Daniel Potter, Charles-Alexis Asselineau, Clotilde Corsi, Michael Wagner, Cyril Caliot, Benjamin Piaud, Manuel Blanco, Jin-Soo Kim, and John Pye. Verification of optical modelling of sunshape and surface slope error for concentrating solar power systems. *Solar Energy*, 195 :461–474, 2020.
- [94] Manuel J Blanco, Juana M Amieva, and Azael Mancillas. The tonatiuh software development project : An open source approach to the simulation

- of solar concentrating systems. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, volume 42142, pages 157–164, 2005.
- [95] Daniel F Potter, Jin-Soo Kim, Alex Khassapov, Ric Pascual, Lachlan Hetherington, and Zikai Zhang. Heliosim : An integrated model for the optimisation and simulation of central receiver csp facilities. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2033, page 210011. AIP Publishing LLC, 2018.
- [96] Tim Wendelin, Aron Dobos, and Allan Lewandowski. Soltrace : a ray-tracing code for complex solar optical systems. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2013.
- [97] Rafael Osuna, Rafael Olavarria, Rafael Morillo, Marcelino Sánchez, Felipe Cantero, Valerio Fernández-Quero, Pedro Robles, T López, Antonio Esteban, Francisco Céron, et al. Ps10, construction of a 11mw solar thermal tower plant in seville, spain. In *Proc. SolarPACES conference, Seville, Spain*, 2006.
- [98] MA Mustafa, S Abdelhady, and AA Elweteedy. Analytical study of an innovated solar power tower (ps10) in aswan. *International Journal of Energy Engineering*, 2(6) :273–278, 2012.
- [99] Manuel Romero, Reiner Buck, and James E Pacheco. An update on solar central receiver systems, projects, and technologies. *Journal of solar energy engineering*, 124(2) :98–108, 2002.
- [100] Elwood Charles Downey. Xephem : Interactive astronomical ephemeris. *Astrophysics Source Code Library*, 2011.
- [101] Bruce Walter, Stephen R Marschner, Hongsong Li, and Kenneth E Torrance. Microfacet models for refraction through rough surfaces. *Rendering techniques*, 2007 :18th, 2007.
- [102] Thierry Elias, Didier Ramon, Jean-Florian Brau, and Mustapha Moulana. Sensitivity of the solar resource in solar tower plants to aerosols and water

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

- vapor. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2126, page 190006. AIP Publishing LLC, 2019.
- [103] Michael Hess, Peter Koepke, and I Schult. Optical properties of aerosols and clouds : The software package opac. *Bulletin of the American meteorological society*, 79(5) :831–844, 1998.
- [104] B.N. Holben, T.F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov. Aeronet—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1) :1 – 16, 1998. ISSN 0034-4257. doi : [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425798000315>.
- [105] Thierry Elias, Didier Ramon, Laurent Dubus, Morag Am-Shallem, and Gil Kroyzer. Dni and slant path transmittance for the solar resource of tower thermal solar plants : The validation of the asora method and impact in exploiting a global data set. *Solar Energy*, 217 :78–92, 2021. ISSN 0038-092X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.064>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X20313232>.
- [106] D. Buie and A.G. Monger. The effect of circumsolar radiation on a solar concentrating system. *Solar Energy*, 76(1) :181 – 185, 2004. ISSN 0038-092X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.07.032>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03003451>. Solar World Congress 2001.
- [107] Amos Danielli, Yossi Yatir, and Oded Mor. Improving the optical efficiency of a concentrated solar power field using a concatenated micro-tower configuration. *Solar Energy*, 85(5) :931 – 937, 2011. ISSN 0038-092X. doi : <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.009>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11000533>.

Modélisation et analyse du flux collecté par une centrale solaire à tour dans une atmosphère réaliste : couplage centrale solaire - atmosphère dans un code de transfert radiatif Monte-Carlo

- [108] G. P. Anderson and U.S. Air Force Geophysics Laboratory. *AFGL atmospheric constituent profiles (0-120km) [microform]* / G.P. Anderson ... [et al.]. Optical Physics Division, Air Force Geophysics Laboratory Hanscom AFB, MA, 1986.
- [109] Eike Bierwirth, Manfred Wendisch, Andre Ehrlich, Birgit Heese, Matthias Tesche, Dietrich Althausen, Alexander Schladitz, Detlef Mueller, Sebastian Otto, Thomas Trautmann, et al. Spectral surface albedo over morocco and its impact on radiative forcing of saharan dust. *Tellus B : Chemical and Physical Meteorology*, 61(1) :252–269, 2009.
- [110] B. Reinhardt, R. Buras, L. Bugliaro, S. Wilbert, and B. Mayer. Determination of circumsolar radiation from meteosat second generation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(3) :**Page 823**, 2014. doi : 10.5194/amt-7-823-2014. URL <https://www.atmos-meas-tech.net/7/823/2014/>.