

Optimisation de la conception de collecteurs d'énergie solaire concentrée par méthodes de Monte-Carlo intégrées à un outil de synthèse d'image.

Jérémy DE LA TORRE^{1*}, Jean-Jacques BEZIAN¹, Mouna EL HAFI¹ et Richard FOURNIER²

¹Laboratoire RAPSODEE, UMR CNRS 2392, Ecole des Mines d'Albi – 81000 ALBI

²Laboratoire LAPLACE, UMR CNRS 5213, Université Paul SABATIER – 31000 TOULOUSE

* (auteur correspondant : delatorr@mines-albi.fr)

Résumé - Cette communication s'intéresse à la concentration du rayonnement solaire. Elle présente une approche intégrale, basée sur des outils statistiques de Monte-Carlo. Cette méthode est ensuite illustrée par un exemple applicatif et nous comparons ses résultats avec ceux d'un logiciel de référence. De plus, nous avons intégré nos algorithmes à une bibliothèque d'outils de synthèse d'image. Cela permet de traiter avec des temps de calculs très performants les géométries complexes rencontrées en concentration solaire.

Nomenclature

x_M	point du miroir	θ_i	angle du rayon incident sur le miroir
x_C	point de la cible	θ_r	angle du rayon réfléchi sur la cible
(φ, θ)	direction du rayon venant du soleil	Ω_S	angle solide du disque solaire
d	distance entre x_M et x_C	DNI	ensoleillement normal direct (W/m ²)
$p_{x_M}, p_{x_C}, p_\varphi, p_\theta$	densités de probabilités (<i>pdf</i>) associées à la génération aléatoire de $x_M, x_C, \varphi, \theta$	H_S, H_C	fonctions de Heaviside (tests d'intersection sur le soleil, sur la cible)

1. Introduction

Les procédés solaires à concentration, tels que les centrales à tour, représentent maintenant une technologie mature pour la production d'électricité. Ils constituent sans doute l'alternative la plus crédible, au niveau mondial, à l'utilisation de ressources fossiles [1].

L'implantation des champs d'héliostats, par leurs coûts foncier et d'investissement, et par leur efficacité optique, devient un paramètre important dans la qualité et les performances d'une centrale solaire thermodynamique. En effet, il est devenu nécessaire de travailler à des températures plus élevées (pour améliorer les rendements des cycles thermodynamiques) et de mieux prédire les hétérogénéités de densité de flux au niveau des récepteurs (les matériaux étant utilisés plus près de leurs limites).

Les outils de dimensionnement actuels sont directement issus des logiciels élaborés dans les années 1970. Ils sont basés principalement sur l'utilisation de lanceurs de rayons, ou utilisent des produits de convolution [2]. Par ailleurs, ces outils sont plutôt des simulateurs de performance *a posteriori* que des outils d'optimisation de conception.

La communication proposée présente une nouvelle approche, basée sur des outils statistiques de Monte-Carlo développés dans notre équipe. L'approche intégrale que nous avons adoptée permet, pour tout calcul, avec un surcoût très faible, de connaître l'ensemble des sensibilités de la solution par rapport à tous les paramètres, y compris géométriques [3].

De plus, nous avons intégré les algorithmes de nos simulateurs à une bibliothèque logicielle d'outils de synthèse d'images [4]. Cela permet de traiter avec des temps de calculs très performants les géométries complexes rencontrées en concentration solaire.

Après avoir présenté la méthode utilisée, nous développons un exemple d'application portant notamment sur le choix de la formulation intégrale et sur l'optimisation de la hauteur de la tour.

2. La méthode développée

Nos travaux s'appuient sur une approche intégrale de la résolution de l'Equation des Transferts Radiatifs (ETR) par une méthode statistique de type Monte-Carlo. Les algorithmes de résolution sont ensuite intégrés à une bibliothèque logicielle d'outils de synthèse d'image. Les résultats obtenus sont comparés à ceux du logiciel SOLTRACE, développé par le National Renewable Energy Laboratory du département de l'Energie des Etats Unis.

2.1. Algorithmes de Monte-Carlo : approche intégrale

La méthode de Monte-Carlo, très générale et applicable à de très nombreux domaines de calcul, est considérée comme une méthode de référence, non pas du fait de l'exactitude de ses résultats, mais parce qu'elle donne systématiquement leur erreur statistique associée. Il s'agit dans tous les cas d'estimer une valeur moyenne à partir d'un grand nombre N de réalisations de variables aléatoires parentes indépendantes X_i . Les équations suivantes donnent les expressions de la variable aléatoire A à estimer et de son écart type σ_A directement lié à σ_X qui est l'écart type communs à toutes les variables aléatoires X_i . En pratique σ_X est estimé à partir des N réalisations x_i des variables aléatoires X_i .

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad \sigma_A = \frac{\sigma_X}{\sqrt{N}} \quad \sigma_A \approx \frac{\sqrt{\langle x_i^2 \rangle_N - \langle x_i \rangle_N^2}}{\sqrt{N}} \quad (1,2,3)$$

Dans notre cas, la grandeur moyenne étudiée correspond à l'ETR présentée sous forme intégrale. Pour une position de soleil donnée et une configuration de champ d'héliostats donnée, nous cherchons à connaître la carte des flux solaires arrivant sur une cible. Nous pourrions ainsi prédire la qualité de cette carte de flux, et l'influence des divers paramètres sur son homogénéité, sa densité ...

Si l'intégrale est écrite sous la forme suivante (Eq. 4) :

$$I = \int f(x) dx \quad (4)$$

on introduit une fonction de densité de probabilité p_X , ainsi qu'une fonction poids w_I associée au calcul de I (Eq. 5,6), ce qui permet de regarder I comme une valeur moyenne.

$$I = \int p_X(x) \frac{f(x)}{p_X(x)} dx = \int p_X(x) w_I(x) dx \quad \text{avec} \quad w_I = \frac{f}{p_X} \quad (5,6)$$

On effectue ensuite N réalisations de la variable aléatoire X selon p_X et on calcule leurs poids

$$\{x_i\}_{i=1,N} \Rightarrow \{w_{I,j} = w_I(x_j)\}_{j=1,N} \quad (7)$$

pour obtenir la valeur de l'intégrale I (espérance de W_I , Eq. 8) et de la précision du calcul (écart type, Eq. 9). Pour faire le lien avec les équations (1,2) $I=A$ et a est une réalisation de la variable aléatoire A .

$$I = E(W_I) = A \approx a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_{I,j} \quad \sigma_A \approx \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N w_{I,j}^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N w_{I,j} \right)^2}}{\sqrt{N}} \quad (8,9)$$

2.2. La bibliothèque logicielle de synthèse d'images : PBRT

La résolution de l'ETR, appliquée au calcul des flux reçus par concentration de l'énergie solaire sur une surface donnée, ne pose pas de problème théorique particulier. Cependant, les champs d'héliostats sont constitués de plusieurs centaines (voire plusieurs milliers) d'éléments unitaires, eux-mêmes composés d'au moins une dizaine de miroirs. La complexité géométrique induite doit être prise en compte par le calcul, notamment au niveau des ombres et des blocages liés aux interférences entre héliostats.

Nous avons déjà travaillé avec des chercheurs en informatique qui utilisent des outils de synthèse d'image pour améliorer la rapidité de nos algorithmes [5] en particulier lors des calculs d'intersections dans des géométries complexes. Plutôt que d'introduire des algorithmes de synthèse d'image dans nos codes de résolution, nous avons préféré intégrer nos codes dans une bibliothèque logicielle libre disponible : l'environnement PBRT (Physically Based Rendering Technics [4]).

L'ensemble des sources de cette bibliothèque, écrite en C++, est disponible, portable et modifiable. Le traitement de la complexité géométrique est intégré au code de synthèse d'image. En considérant le champ d'héliostats éclairé par le soleil comme une scène, on profite directement de l'accélération et l'optimisation des calculs d'intersections. Nous avons donc programmée la résolution de l'ETR par Monte-Carlo au sein du code PBRT.

2.3. Le logiciel de « référence » : SOLTRACE

Nous avons comparé les résultats obtenus par nos propres codes avec le code de calculs solaires SOLTRACE, développé par le laboratoire américain NREL. La méthode de calcul de ce logiciel utilise une technique de lancer de rayons.

L'exécutable de ce logiciel est disponible gratuitement, les sources du code n'étant pas libres, il n'est pas modifiable. Son manuel d'utilisation permet une prise en main rapide ; le pré- (et le post-) traitement passe par un tableur, qu'il faut développer en fonction des applications. Malgré ces lourdeurs, ce logiciel est à l'heure actuelle considéré comme un des meilleurs outils de calcul des flux solaires [2]

3. La mise au point des algorithmes

Le point le plus délicat dans la mise en œuvre de la méthode de Monte-Carlo dans la configuration qui nous concerne est certainement le choix de la formulation intégrale.

Pour aborder cette question dans un cas simple, la configuration étudiée ci-dessous comporte un héliostat plan (le miroir) de 100m^2 et un capteur (la cible) situé en haut d'une tour (de hauteur variable) à 200m au sud du miroir. La formulation de ce problème peut être envisagée de 2 façons :

- soit on "choisit" un point x_M sur la surface du miroir selon une *pdf* uniforme et une direction d'incidence (φ, θ) selon une *pdf* uniforme à l'intérieur du cône solaire, puis, par réflexion, on calcule le chemin optique et l'éventuelle intersection avec la cible (Fig. 1 gauche ; Eq. 10,11) ;
- soit on "choisit" un point sur la cible x_C et un autre sur le miroir x_M (tirés de manière uniforme sur les deux surfaces), puis on regarde si le chemin optique passe par le disque solaire (Fig. 1 droite ; Eq. 12,13).

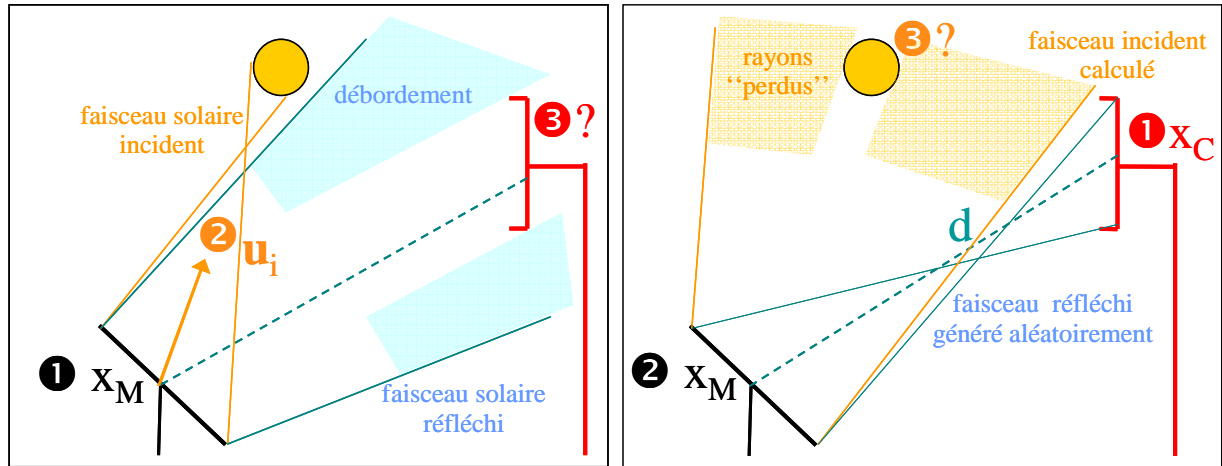


Figure 1 : Schémas des algorithmes (gauche : 1^{ère} formulation - droite : 2^{de} formulation)

3.1. Première formulation : Tirage sur le disque solaire

Si on appelle P la puissance solaire interceptée par la cible (somme des contributions de tous les points du champ d'héliostats qui éclairent la cible), on obtient l'équation 10 :

$$P = \int_{\text{Miroir}} p_{X_M}(x_M) dx_M \int_0^{2\pi} p_{\Phi}(\varphi) d\varphi \int_0^{\theta_{\max}} p_{\Theta}(\theta) d\theta w_1 \quad (10)$$

Le poids associé à cette formulation est donné par l'équation 11.

$$w_1 = H_C \cos \theta_i \frac{DNI}{\Omega_S} \times \sin \theta \times \frac{1}{p_{X_M}(x_M) p_{\Phi}(\varphi) p_{\Theta}(\theta)} \quad (11)$$

3.2. Seconde formulation : Tirage depuis la cible

De la même façon, on peut exprimer la puissance P arrivant sur la cible comme la somme des puissances élémentaires reçues par chaque élément de surface dx_C :

$$P = \int_{\text{Cible}} p_{X_C}(x_C) dx_C \int_{\text{Miroir}} p_{X_M}(x_M) dx_M w_2 \quad (12)$$

avec le poids w_2 donné par l'équation suivante :

$$w_2 = \frac{\cos \theta_r \cos \theta_i}{d^2} H_S \frac{DNI}{\Omega_S} \times \frac{1}{p_{X_C}(x_C) p_{X_M}(x_M)} \quad (13)$$

Nous avons ensuite comparé les temps de calcul et la précision des résultats obtenus par les deux formulations ainsi que par SOLTRACE.

4. Résultats obtenus

Nous avons d'abord validé la méthode proposée en confrontant nos résultats à ceux obtenus sous SOLTRACE, puis nous avons étudié un premier cas d'application, portant sur la hauteur de la cible.

4.1. Comparaison des codes : Calculs de validation

Le tableau suivant compare les résultats obtenus par la première formulation et par le code SOLTRACE pour une latitude de 35 ° N, une hauteur de tour de 50m et pour quatre positions différentes du soleil (quatre instants de l'année).

Date et heure	PBRT P(kW)	Ecart type (PBRT)	Soltrace P(kW)	Ecart type (Soltrace)	Ecart Relatif
21 mars midi	87,361	$23,5 \cdot 10^{-3}$	87,253	indisponible	0.12%
21 juin midi	80,845	$17,5 \cdot 10^{-3}$	80,832	indisponible	0.02%
21 déc midi	89,956	$28,3 \cdot 10^{-3}$	89,947	indisponible	0.01%
21 mars 9h	81,549	$22,2 \cdot 10^{-3}$	81,629	indisponible	0.10%

Tableau 1 : Puissance interceptée par la cible, pour 4 positions de soleil

L'écart relatif est défini comme la différence absolue entre P_{PBRT} et $P_{SOLTRACE}$ divisée par $P_{SOLTRACE}$ qui sert ici de référence. La très bonne concordance des résultats valide l'algorithme développé pour la première formulation. On explique que la puissance solaire interceptée par la cible est plus élevée en hiver (Tab. 1 ; Fig.1-2), parce que le soleil est plus bas, et l'angle « soleil, héliostat, cible » plus petit ($\cos \theta_i$ plus grand). D'autre part, pour le 21 mars, l'efficacité est meilleure à midi qu'à 9 h.

4.2. Variation de la hauteur de la tour

La figure 2 reprend les conditions précédentes, avec une variation de la hauteur de la tour entre 10 et 100 m. On y présente les résultats de la première formulation. On constate que, pour les diverses positions de soleil, la hauteur de tour passe par un optimum, compromis entre la valeur de l'angle « soleil, héliostat, cible » (effet positif quand la hauteur augmente) et la distance héliostat - cible (effet négatif à cause du débordement quand la hauteur augmente). La hauteur optimale dépend de la date et de l'heure. Elle est plus faible en hiver qu'en été.

La figure 3 présente les résultats de la seconde formulation pour les mêmes simulations. On remarque que les barres d'erreurs y sont plus grandes. En effet l'écart type associé aux résultats de la seconde formulation sont environ 10 fois plus élevés que ceux de la première formulation. Cela s'explique par une meilleure efficacité du tirage partant du soleil (moins de rayons perdus). Les résultats étant identiques sur les deux figures, la seconde formulation est validée. Pour une précision identique elle requiert cependant 100 fois plus de tirages.

4.3. Temps de calcul

Les premiers calculs effectués sur cette configuration de base montrent que notre environnement logiciel est beaucoup plus performant que le logiciel SOLTRACE. En effet, les temps de simulation obtenus pour ces tests sur une géométrie simple sont environ dix fois plus courts sous PBRT que sous SOLTRACE. Comme nous n'avons pas fait appel à la faculté de PRBT pour traiter des géométries complexes, ces résultats sont prometteurs et les gains de temps que l'on obtiendra sur des géométries plus réalistes seront sans doute bien supérieurs.

5. Conclusions et perspectives

La méthodologie mise en place dans le cadre de cette étude commence à donner de très bons résultats : les résultats obtenus ont validé les deux formulations utilisées, et les temps de calculs sont prometteurs. De plus, les potentialités de notre environnement logiciel sont très vastes, et sont déjà utilisées dans d'autres domaines (photobioréacteurs, tomographie optique en médecine où l'on cherche à résoudre l'ETR dans des milieux turbides).

Il reste maintenant à formuler l'ensemble des calculs de sensibilités pour pouvoir entamer des calculs d'optimisation de conception de collecteurs d'énergie solaire concentrée.

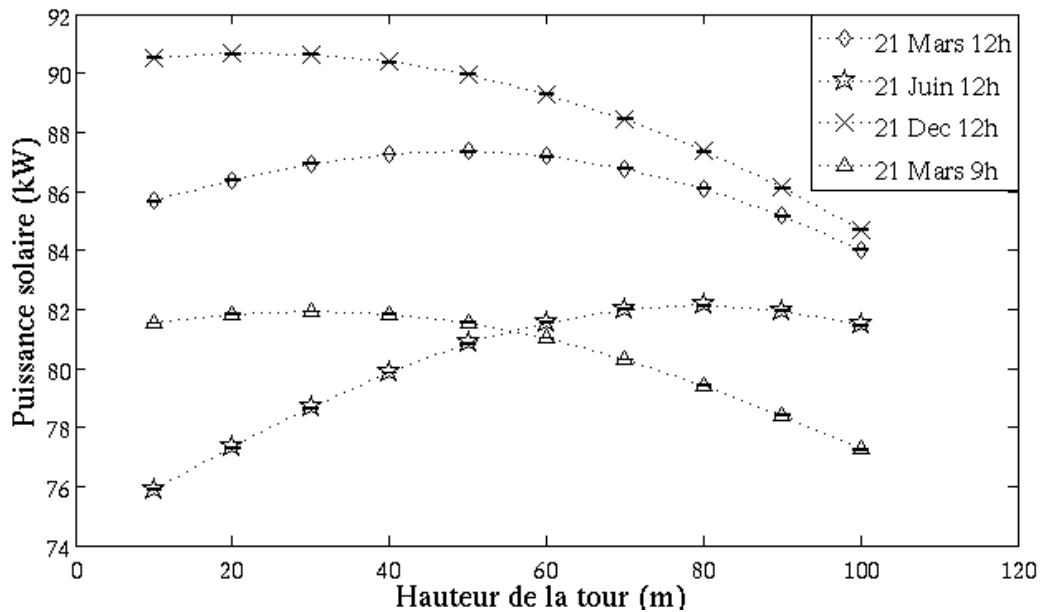


Figure 2 : Puissance solaire interceptée en fonction de la hauteur de la cible (1^{ère} Formulation)

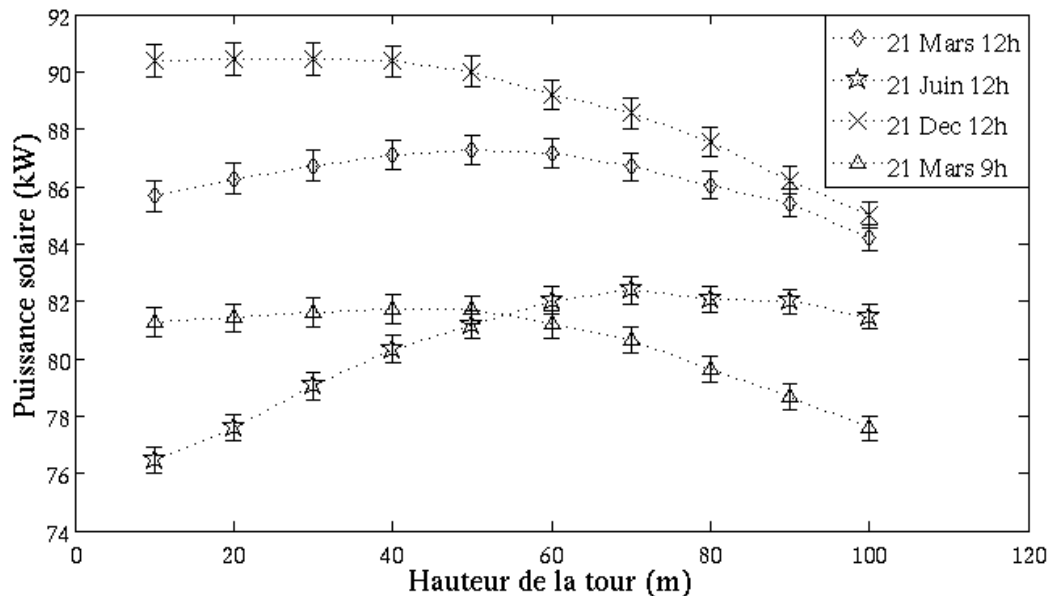


Figure 3 : Puissance solaire interceptée en fonction de la hauteur de la cible (2^{de} Formulation)

Références

- [1] D. Mills, Advances in solar thermal electricity technology, *Solar Energy*, vol. 76, (2004), 19-31
- [2] P. Garcia, A. Ferrière et J-J Bézian, Codes for solar flux calculation dedicated to central receiver system applications: a comparative review, *Solar Energy*, vol. 82, n° 3, (2008), 189-197
- [3] M Roger, S. Blanco, M. El Hafi et R. Fournier, Monte-Carlo estimates of domain-deformation sensitivities, *Physical Review Letters*, vol. 95, n° 18, (2005), 180601.1-180601.4
- [4] M. Pharr and G. Humphreys, PBRT: Physically Based Rendering from theory to implementation, *Elsevier*, (2004)
- [5] P. Perez, Algorithmes de synthèse d'images (...) : méthode de Monte-Carlo pour la simulation des transferts radiatifs dans les procédés à haute température, *Thèse de l'INP Toulouse*, (2003)