

Journée SFT GDR ACCORT : Calcul direct de l'énergie collectée annuellement par un système de concentration solaire.

O. FARGES^{1 2}, J.J. BÉZIAN¹, M. EL HAFI¹ ET H. BRU²

¹Centre RAPSODEE, UMR CNRS 5302, École des Mines d'Albi-Carmaux, 81013 Albi Cedex 09, France

²Total New Energies, R&D - Concentrated Solar Technologies, Immeuble Lafayette2, place des Vosges - La Défense 5,
92078 Paris La Défense Cedex, France

10 Octobre 2012



- 1 Introduction
- 2 Optimisation des centrales solaires à tour
- 3 État de l'art
- 4 Optimisation en énergie annuelle
- 5 Performances de calcul
- 6 Conclusion et perspectives



- 1 **Introduction**
- 2 Optimisation des centrales solaires à tour
- 3 État de l'art
- 4 Optimisation en énergie annuelle
- 5 Performances de calcul
- 6 Conclusion et perspectives



Cadre de la thèse

- Financée par Total (Gaz et Énergies Nouvelles) : thèse CIFRE ;
- Directeurs de thèse : Mouna El Hafi et Jean-Jacques Bézian ;
- Responsable entreprise : Hélène Bru ;
- Début de la thèse : 1^{er} Avril 2011 ;

Objectif de la thèse

- Outil de conception de centrale solaire à tour ;
- Mise en application sur la conception d'une centrale à cycle combiné de type « beam down » ;

- 1 Introduction
- 2 Optimisation des centrales solaires à tour
- 3 État de l'art
- 4 Optimisation en énergie annuelle
- 5 Performances de calcul
- 6 Conclusion et perspectives



Sommaire
Introduction
Optimisation des centrales solaires à tour
État de l'art
Optimisation en énergie annuelle
Performances de calcul
Conclusion et perspectives

Un ensemble complexe
De nombreux paramètres
Une question : à quelle(s) date(s)



Un grand nombre de paramètres permettent de définir une installation solaire à récepteur central

- le champ d'héliostats :
 - Sa forme : circulaire, quart de cercle, ...
 - Sa taille,
 - Sa configuration (radiale, spirale phyllotaxique, ...);
- Les héliostats
 - Le nombre de miroirs,
 - La taille des miroirs,
 - La forme de l'héliostat, ...
- ...



Une question centrale : à quelle date optimiser

- Ce que l'on veut maximiser : l'énergie reçue par le récepteur durant l'utilisation de la centrale ;
- Différent le 13 juillet à 9h et le 26 janvier à 14h ;
- Comment gérer cet aspect dans la phase de conception ?

- 1 Introduction
- 2 Optimisation des centrales solaires à tour
- 3 État de l'art
- 4 Optimisation en énergie annuelle
- 5 Performances de calcul
- 6 Conclusion et perspectives

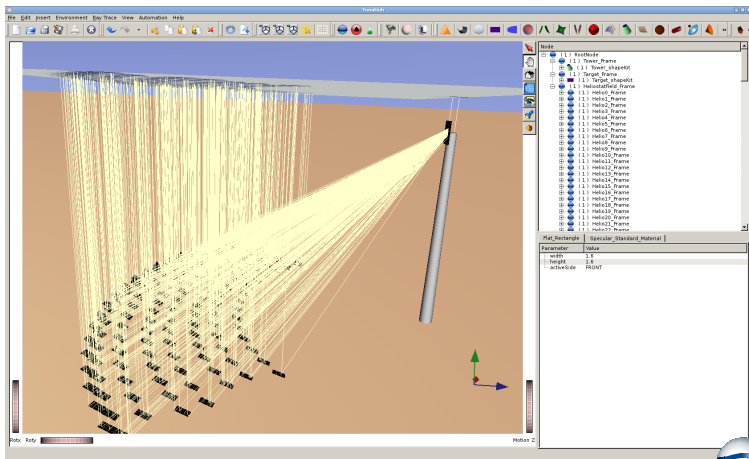


Ce qui existe

Logiciels de lancer de rayons

- Exemples : Soltrace, Tonatiuh, SolFast, ... ;
- Estimation d'une puissance : simulation pour une seule date ;
- Enchainement de simulations pour estimer les performances annuelles ;

Exemple : Tonatiuh



Ce qui existe

Logiciels de lancer de rayons

- Exemples : Soltrace, Tonatiuh, SolFast, ... ;
- Estimation d'une puissance : simulation pour une seule date ;
- Enchaînement de simulations pour estimer les performances annuelles ;

Codes basés sur un modèle simplifié

- Exemples : HFLCAL, System Advisor Model (SAM)
- Utilisation d'un modèle simplifié pour calculer des performances annuelles ;

Ce dont on a besoin

- Code précis et rapide ;
- Intégration dans une boucle d'optimisation (type essaim de particules) ;
- Prise en compte des données météorologiques d'un lieu (*année météo type*) ;

Particle Swarm Optimization (PSO)

- Technique d'optimisation stochastique ;
- Une particule représente une configuration pour la centrale ;
- Les valeurs des paramètres sont générées aléatoirement à l'itération 0 ;
- Aux itérations suivantes, les valeurs sont obtenues en combinant les résultats de la meilleure particule de l'essaim et le meilleur résultat de chaque particule aux itérations précédentes ;
- 100 itérations pour 50 particules, soit 5000 simulations ;

- 1 Introduction
- 2 Optimisation des centrales solaires à tour
- 3 État de l'art
- 4 Optimisation en énergie annuelle**
- 5 Performances de calcul
- 6 Conclusion et perspectives



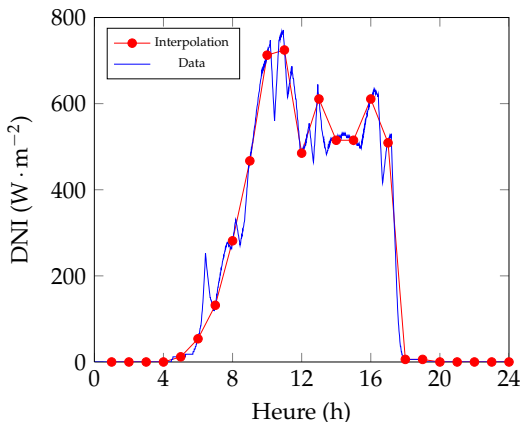
Notre proposition : raisonner en énergie et non en puissance

- Ajout d'une intégrale sur le temps pour prendre en compte les positions du soleil sur l'année ;
- Algorithme de Monte Carlo codé dans l'environnement de développement EDStar ;

Obtention du DNI (Direct Normal Irradiance) Interpolation à partir de données collectées sur site

- À partir de fichiers météo *année type* pour un lieu ;
- Données toutes les 30 minutes ;
- Interpolation linéaire pour trouver une valeur de DNI à un instant t ;
- Pour un DNI trop faible : pas de production de la centrale
(Exemple $DNI \leq 300W \cdot m^{-2}$)

Interpolation linéaire des DNI



L'environnement EDSTAR

- Environnement de Développement en STATistiques Radiatives (EDSTAR) : simulation des phénomènes de transport corpusculaire, en particulier du transfert radiatif ;
- Utilisation PBRT (Physically Based Rendering Techniques) : bibliothèque de synthèse d'image (suivi de rayons en géométrie complexe) :
 - Découple l'algorithme de Monte Carlo et la géométrie ;
 - Possibilité de tester plusieurs géométries rapidement ;
 - Utilisation des fonctions d'intersection présentes dans PBRT ;

Description de l'algorithme Monte Carlo Sun Tracking « MCST »

Description de l'algorithme Monte Carlo Sun Tracking « MCST »



$$A = \int_{\Delta} p_{\Delta}(\delta) d\delta \int_H p_H(\eta) d\eta$$

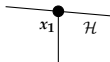
Jour : $\delta \in [0; 365]$

Heure : $\eta \in [7; 19]$

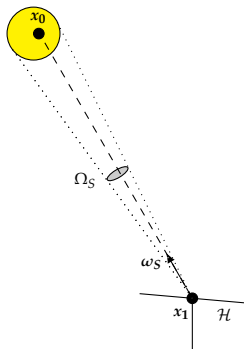
Description de l'algorithme Monte Carlo Sun Tracking « MCST »



$$A = \int_{\Delta} p_{\Delta}(\delta) d\delta \int_H p_H(\eta) d\eta \int_{H+} p_{X_1}(x_1) dx$$



Description de l'algorithme Monte Carlo Sun Tracking « MCST »

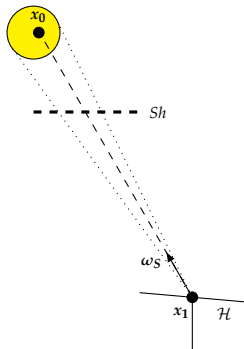


\mathcal{T}

$$A = \int_{\Delta} p_{\Delta}(\delta) d\delta \int_H p_H(\eta) d\eta \int_{H^+} p_{x_1}(x_1) dx$$

$$\int_{\Omega_S} p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S$$

Description de l'algorithme Monte Carlo Sun Tracking « MCST »

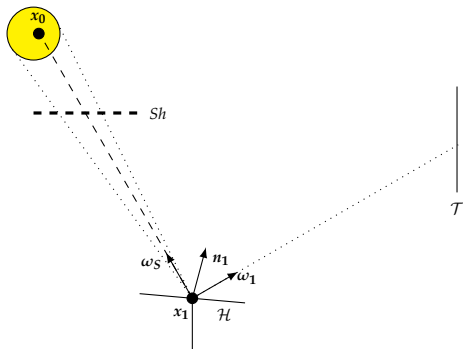


T

$$A = \int_{\Delta} p_{\Delta}(\delta) d\delta \int_H p_H(\eta) d\eta \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx$$

$$\int_{\Omega_S} p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S \times \begin{cases} H(x_0 \in (\mathcal{H} \cup \mathcal{T})) \hat{w}_{out} \\ + H(x_0 \notin (\mathcal{H} \cup \mathcal{T})) \end{cases}$$

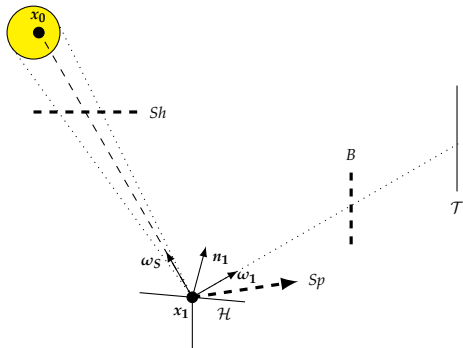
Description de l'algorithme Monte Carlo Sun Tracking « MCST »



$$A = \int_{\Delta} p_{\Delta}(\delta) d\delta \int_H p_H(\eta) d\eta \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx$$

$$\int_{\Omega_S} p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S \times \begin{cases} H(x_0 \in (\mathcal{H} \cup \mathcal{T})) \hat{w}_{out} \\ + H(x_0 \notin (\mathcal{H} \cup \mathcal{T})) \end{cases}$$

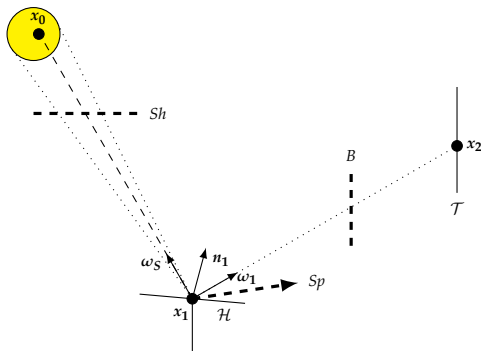
Description de l'algorithme Monte Carlo Sun Tracking « MCST »



$$A = \int_{\Delta} p_{\Delta}(\delta) d\delta \int_H p_H(\eta) d\eta \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx$$

$$\int_{\Omega_S} p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S \times \begin{cases} H(x_0 \in (\mathcal{H} \cup \mathcal{T})) \hat{w}_{out} \\ + H(x_0 \notin (\mathcal{H} \cup \mathcal{T})) \times \{H(x_2 \notin \mathcal{T}) \hat{w}_{out} \end{cases}$$

Description de l'algorithme Monte Carlo Sun Tracking « MCST »



$$A = \int_{\Delta} p_{\Delta}(\delta) d\delta \int_H p_H(\eta) d\eta \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx_1$$

$$\int_{\Omega_S} p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S \times \left\{ \begin{aligned} &H(x_0 \in (\mathcal{H} \cup \mathcal{T})) \hat{w}_{out} \\ &+ H(x_0 \notin (\mathcal{H} \cup \mathcal{T})) \times \{ H(x_2 \notin \mathcal{T}) \hat{w}_{out} \\ &+ H(x_2 \in \mathcal{T}) \hat{w}_{in} \} \end{aligned} \right\}$$

$$\hat{w}_{in} = DNI(\omega_S \cdot \mathbf{n}_1) S_{\mathcal{H}^+}$$

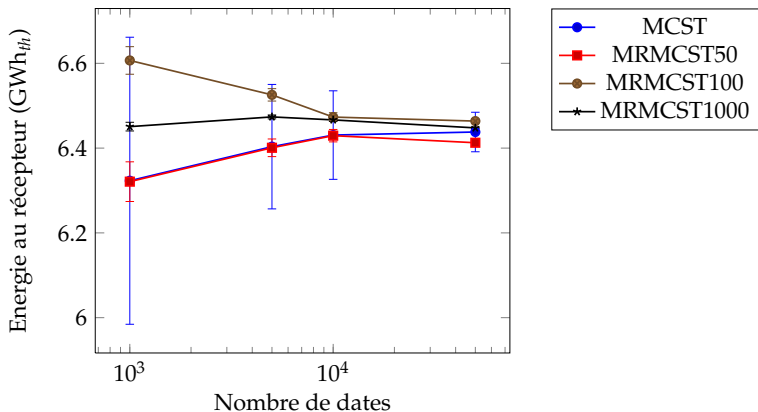
Combien de dates pour être représentatif de l'année ?

Combien de dates pour être représentatif de l'année ?

- Peu de dates : rapide mais barres d'erreur très larges ;
- Beaucoup de dates : très précis mais lent ;
- Réorientation du champ à chaque réalisation : couteux en terme de temps de calcul ;
- Un seul rayon pour chaque orientation ;

Version Multi Ray Monte Carlo Sun Tracking « MRMCSST »

- Pour une date, plusieurs rayons sont lancés sur le champ d'héliostats ;
- Réduction des barres d'erreur ;
- ATTENTION : il faut simuler un nombre suffisant de dates pour être représentatif de l'année ;
- Questions :
 - Combien de réalisations pour chaque date ?
 - Combien de dates pour être représentatif ?



Comparaison de MCST et MRMCS

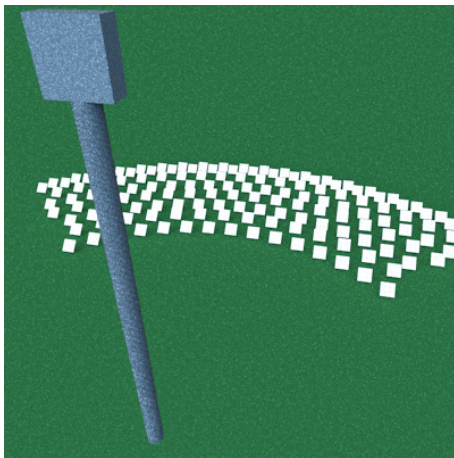
- 1 Introduction
- 2 Optimisation des centrales solaires à tour
- 3 État de l'art
- 4 Optimisation en énergie annuelle
- 5 Performances de calcul**
- 6 Conclusion et perspectives



Hypothèses pour le cas test

- Comparaison avec Tonatiuh ;
- Centrale à tour ;
- 146 heliostats (9 miroirs carrés de 1.6m de coté) ;
- Champ d'héliostats élaboré selon la méthode MUEEN (Agencement radial étagé) ;
- Les réflexions sont spéculaires ;
- La centrale se trouve sur l'équateur ;
- L'entrée du récepteur est un carré de 4m de coté ;
- Sur un PC de bureau AMD Phenom II X6 1055T 2.8GHz et 4Mo RAM





Dates	Tonatiuh	MCST
Équinoxe de printemps	2.97MW	2.97MW ± 72W
Solstice d'été	3.19MW	3.19MW ± 98W
Équinoxe d'automne	2.98MW	2.98MW ± 73W
Solstice d'hiver	3.19MW	3.19MW ± 98W
50 dates	6.329GWh _{th}	6.323 ± 0.623GWh _{th}

Dates	MCST	MRMCST 100
50000 dates	6.437 ± 4.6610 ⁻² GWh _{th}	6.463 ± 4.6110 ⁻³ GWh _{th}

Comparaison des résultats de simulation

Realizations	Tonatiuh	Tonatiuh Eq.	MCST	MRMCST 100
$5 \cdot 10^4$	$\approx 3s$	$2 \cdot 10^5s$	9s	2s
$5 \cdot 10^5$	$\approx 24s$	$2 \cdot 10^6s$	59s	13.9s
$5 \cdot 10^6$	$\approx 156s$	$2 \cdot 10^7s$	814s	91s

Temps de calcul

On évalue comme référence un cas « equivalent Tonatiuh » à comparer à MRMCST en considérant les temps suivants : 4.003s pour chaque date décomposées en ouverture du fichier script (2s), pré et post-processing (2s) et simulation de 100 rayons (3ms).

- 1 Introduction
- 2 Optimisation des centrales solaires à tour
- 3 État de l'art
- 4 Optimisation en énergie annuelle
- 5 Performances de calcul
- 6 Conclusion et perspectives

Conclusion

- Prise en compte des positions du soleil pour optimiser les centrales solaires à concentration ;
- Code rapide et précis (barres d'erreur) ;

Perspectives

- Insertion dans la boucle d'optimisation ;
- Amélioration des lois de tirages selon le fichier météo *année type* ;
- Comparaison avec un code basé sur un modèle simplifié (HFLCAL ou System Advisor Model (SAM)) ;



Merci de votre attention

