

# Journée SFT : Rayonnement solaire concentré Installation à récepteur central et optimisation

FARGES OLIVIER

TOTAL GAS & POWER - RAPSODEE

13 juin 2012



- 1 Introduction
- 2 Optimisation des centrales solaires
- 3 Le type de centrale : beam down
- 4 Le modèle direct
- 5 L'optimisation multi-critère
- 6 Sensibilités géométriques et méthodes de Monte Carlo
- 7 Conclusion et perspectives

- 1 Introduction
- 2 Optimisation des centrales solaires
- 3 Le type de centrale : beam down
- 4 Le modèle direct
- 5 L'optimisation multi-critère
- 6 Sensibilités géométriques et méthodes de Monte Carlo
- 7 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 ;
- Collaboration avec le laboratoire LAPLACE (Toulouse) : Richard Fournier, Stéphane Blanco et Jérémie Dauchet ;
- Début de la thèse : 1<sup>er</sup> Avril 2011 ;

## Contexte

- Regain d'intérêt pour les installations à récepteur central à travers des projets commerciaux ou de recherche de grande ampleur :
  - Projet *GEMASOLAR* inauguré le 6 octobre 2011 ;
  - Projet *IVANPAH* de Brightsource ;
  - Projet *Crescent Dunes* de SolarReserve ;
  - *PS10* et *PS20* à Séville ;
  - Réouverture de la centrale Thémis : projet *PEGASE* ...

## Le futur de la filière

- Installations de grande taille :
  - Obtention de hautes températures : entre 1100K et 1600K ;
  - Cycle de Brayton, cycle combiné ;
  - Procédés de thermochimie :  $H_2$ , gaz de synthèse, ... ;



## Objectif de la thèse

- Outil de conception de centrale solaire « Beam Down » optimisée :
  - Obtention du « meilleur » jeu de paramètres définissant la centrale
- Mise en application sur la conception d'une centrale à cycle combiné ;

- 1 Introduction
- 2 Optimisation des centrales solaires**
- 3 Le type de centrale : beam down
- 4 Le modèle direct
- 5 L'optimisation multi-critère
- 6 Sensibilités géométriques et méthodes de Monte Carlo
- 7 Conclusion et perspectives

## 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, ...
- Le type de centrale : à tour ou beam down ;

...



TOTAL

ECOLE DES MINES D'ALBI  
C A R M A U X

## Le type de centrale

- Centrale solaire à optique beam down

### Le champ d'héliostats

- Forme circulaire ou quart de cercle ;
- Agencement radial étagé ou spirale phyllotaxique ;

### Les héliostats

- Constitués de miroirs plans ;
- Même nombre de miroirs en largeur et en hauteur ;
- Courbure de la structure en fonction de la distance au point focal ;

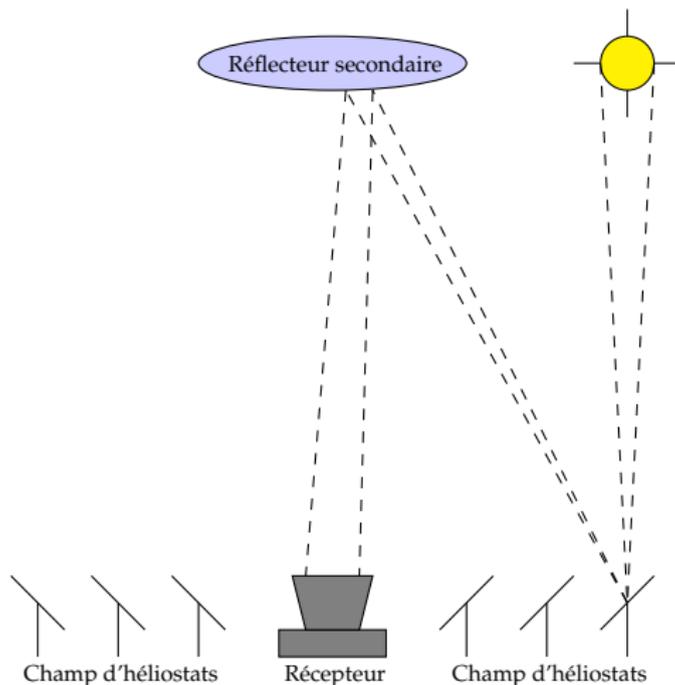


Paramètres : nombre de miroirs (impair) et taille des miroirs

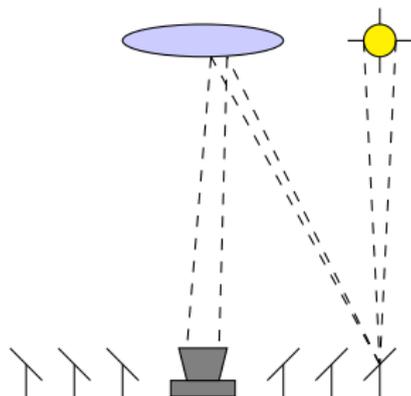


- 1 Introduction
- 2 Optimisation des centrales solaires
- 3 Le type de centrale : beam down**
- 4 Le modèle direct
- 5 L'optimisation multi-critère
- 6 Sensibilités géométriques et méthodes de Monte Carlo
- 7 Conclusion et perspectives

## Le principe du « beam down »

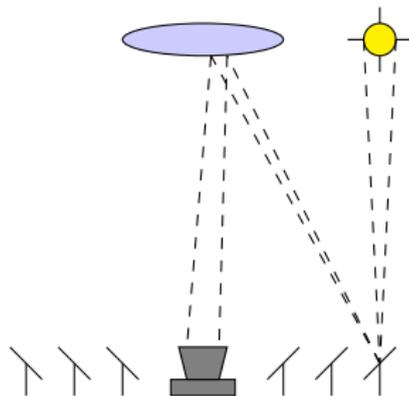


## Le principe du « beam down »

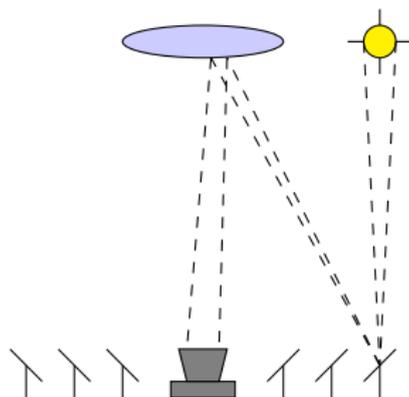


## Le principe du « beam down »

- Cité par Rabl dans les années 70 ;

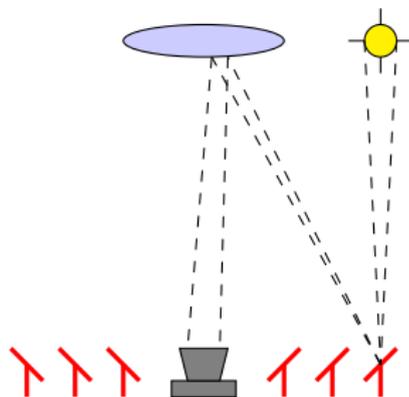


## Le principe du « *beam down* »



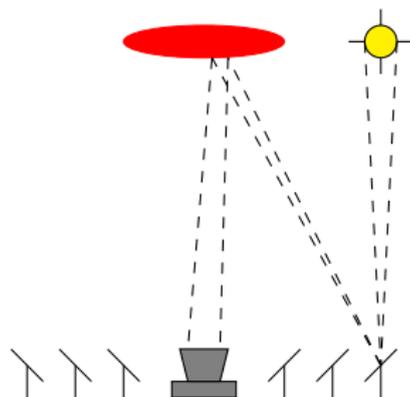
- Cité par Rabl dans les années 70 ;
- 3 composants principaux :

## Le principe du « beam down »



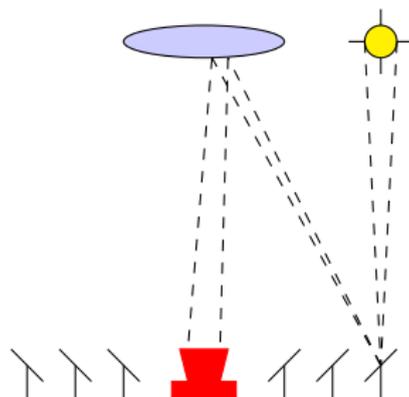
- Cité par Rabl dans les années 70 ;
- 3 composants principaux :
  - Le champ d'héliostats ;

## Le principe du « beam down »



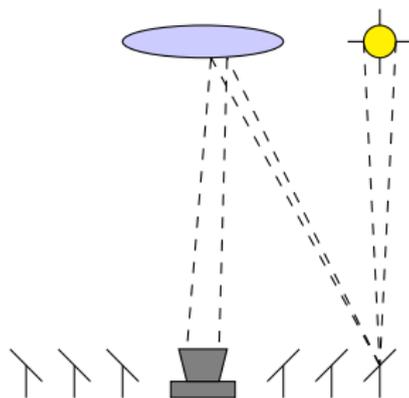
- Cité par Rabl dans les années 70 ;
- 3 composants principaux :
  - Le champ d'héliostats ;
  - Le réflecteur secondaire ;

## Le principe du « beam down »



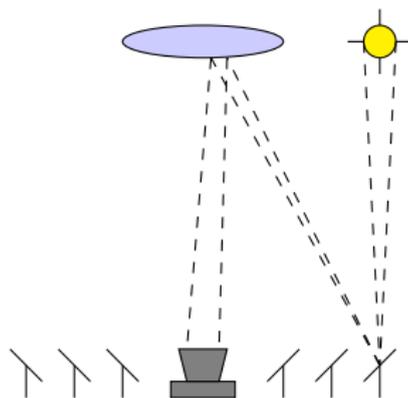
- Cité par Rabl dans les années 70 ;
- 3 composants principaux :
  - Le champ d'héliostats ;
  - Le réflecteur secondaire ;
  - Le récepteur thermique au sol.

## Le principe du « beam down »



- Cité par Rabl dans les années 70 ;
- 3 composants principaux :
  - Le champ d'héliostats ;
  - Le réflecteur secondaire ;
  - Le récepteur thermique au sol.
- Inversion du chemin du rayonnement solaire concentré ;

## Le principe du « *beam down* »



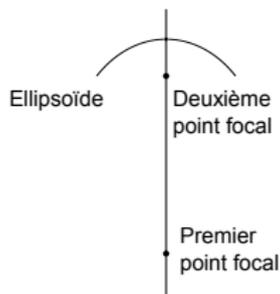
- Cité par Rabl dans les années 70 ;
- 3 composants principaux :
  - Le champ d'héliostats ;
  - Le réflecteur secondaire ;
  - Le récepteur thermique au sol.
- Inversion du chemin du rayonnement solaire concentré ;
- Basé sur les propriétés géométriques de deux surfaces quadratiques (hyperboloïde et ellipsoïde) ;

## Basé sur les propriétés géométriques de deux surfaces quadratiques

## Basé sur les propriétés géométriques de deux surfaces quadratiques

- Des figures géométriques possédant 2 points focaux :

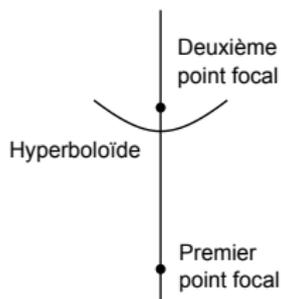
## Basé sur les propriétés géométriques de deux surfaces quadratiques



- Des figures géométriques possédant 2 points focaux :

- Ellipsoïde  $\left( \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \right)$ ;

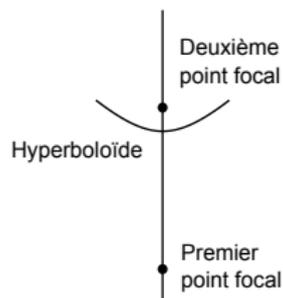
## Basé sur les propriétés géométriques de deux surfaces quadratiques



- Des figures géométriques possédant 2 points focaux :

- Ellipsoïde  $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1\right)$ ;
- Hyperboloïde (à 2 nappes)  $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1\right)$ ;

## Basé sur les propriétés géométriques de deux surfaces quadratiques



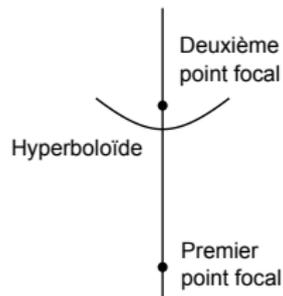
- Des figures géométriques possédant 2 points focaux :

- Ellipsoïde  $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1\right)$ ;

- Hyperboloïde (à 2 nappes)  $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1\right)$ ;

- le point focal haut est ciblé par les héliostats concentrateurs ;

## Basé sur les propriétés géométriques de deux surfaces quadratiques



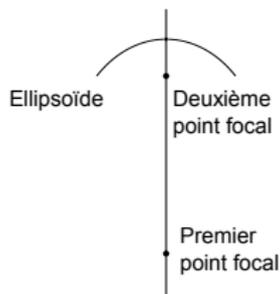
- Des figures géométriques possédant 2 points focaux :

- Ellipsoïde  $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1\right)$ ;

- Hyperboloïde (à 2 nappes)  $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1\right)$ ;

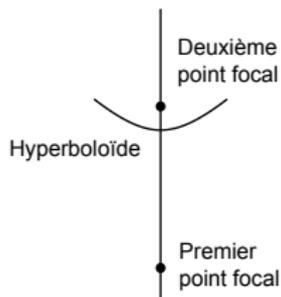
- le point focal haut est ciblé par les héliostats concentrateurs ;
- le point focal bas correspond à l'entrée du récepteur ;

## Basé sur les propriétés géométriques de deux surfaces quadratiques



- la forme hyperboloïde donne de meilleurs résultats car les points focaux sont répartis de part et d'autre de la géométrie :

## Basé sur les propriétés géométriques de deux surfaces quadratiques



- la forme hyperboloïde donne de meilleurs résultats car les points focaux sont répartis de part et d'autre de la géométrie :
  - Un chemin optique plus court ;
  - Les structures sont moins hautes ;
  - Le réflecteur secondaire est moins grand ;
  - Le taux de concentration est meilleur ;

Sommaire

Introduction

Optimisation des centrales solaires

Le type de centrale : beam down

Le modèle direct

L'optimisation multi-critère

Sensibilités géométriques et méthodes de Monte Carlo

Conclusion et perspectives

Le principe

L'existant

## 2 installations de type « *Beam Down* » de taille conséquente dans le monde



ECOLE DES MINES D'ALBI  
C A R M A U X



## 2 installations de type « *Beam Down* » de taille conséquente dans le monde

- Une installation de recherche au Weizmann Institute of Science (Israël) ;

Installation de recherche au Weizmann Institute of  
Science



## 2 installations de type « *Beam Down* » de taille conséquente dans le monde

- Une installation de recherche au Weizmann Institute of Science (Israël) ;
- Une installation pilote de 100kW de MASDAR (Abu Dhabi) développée par le Tokyo Institute of Technology ;

Installation de recherche au Weizmann Institute of  
Science



Installation pilote de 100kW de MASDAR



1 Introduction

2 Optimisation des centrales solaires

3 Le type de centrale : beam down

**4 Le modèle direct**

5 L'optimisation multi-critère

6 Sensibilités géométriques et méthodes de Monte Carlo

7 Conclusion et perspectives

## L'environnement EDSTAR

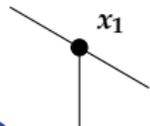
- Environnement de Développement en STATistiques Radiatives (EDSTAR) : simulation des phénomènes de transport corpusculaire, en particulier du transfert radiatif ;
- Utilisation PBRT (Physically Based Rendering Techniques) : bibliothèque de synthèse d'image (suivi de rayons en géométrie complexe) :
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

## Modèle direct : Description de l'algorithme de Monte Carlo

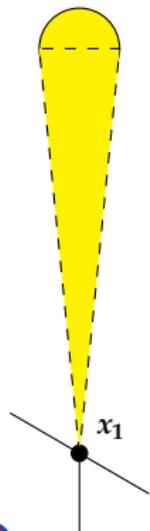
## Modèle direct : Description de l'algorithme de Monte Carlo



$$A = \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx$$

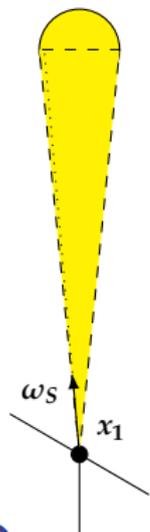


## Modèle direct : Description de l'algorithme de Monte Carlo



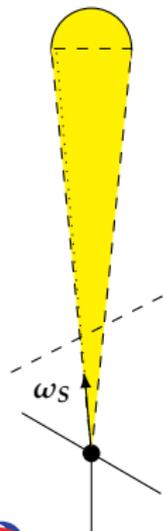
$$A = \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx$$

## Modèle direct : Description de l'algorithme de Monte Carlo



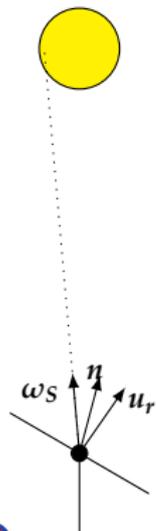
$$A = \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx \int_S p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S$$

## Modèle direct : Description de l'algorithme de Monte Carlo



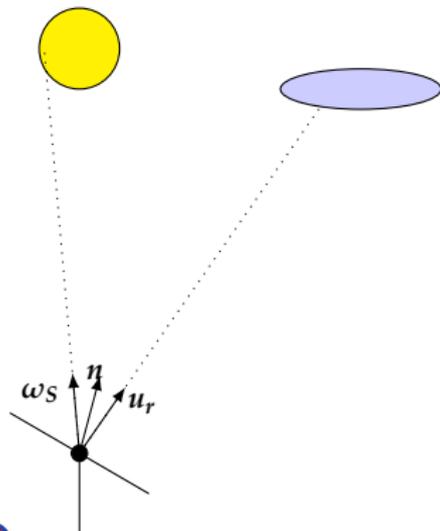
$$A = \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx \int_{\mathcal{S}} p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S \\ \times \{H(x_0 \in (H \cup B)) \hat{w}_{out} + H(x_0 \notin (H \cup B)) \dots$$

## Modèle direct : Description de l'algorithme de Monte Carlo



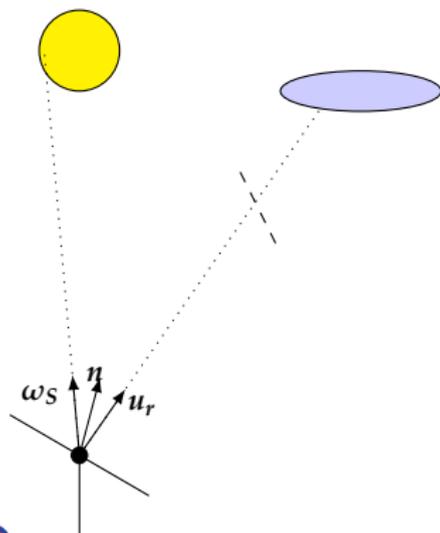
$$A = \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx \int_S p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S \\ \times \{H(x_0 \in (H \cup B)) \tilde{w}_{out} + H(x_0 \notin (H \cup B)) \dots$$

## Modèle direct : Description de l'algorithme de Monte Carlo



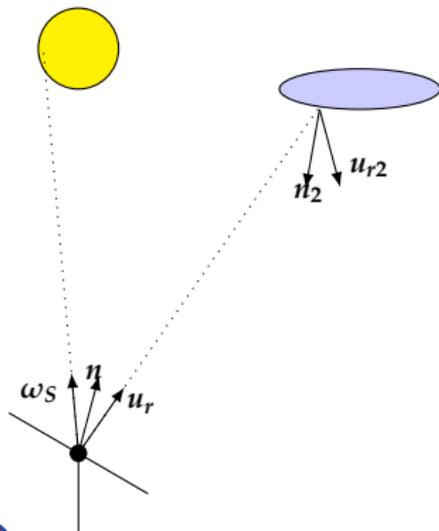
$$A = \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx \int_{\mathcal{S}} p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S \\ \times \{H(x_0 \in (H \cup B)) \hat{w}_{out} + H(x_0 \notin (H \cup B)) \dots$$

## Modèle direct : Description de l'algorithme de Monte Carlo



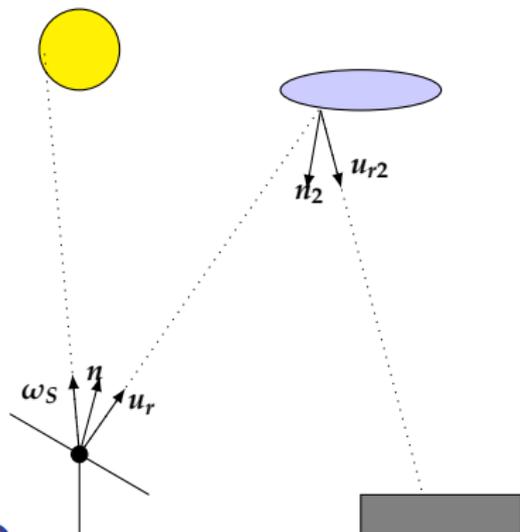
$$\begin{aligned}
 A &= \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx \int_{\mathcal{S}} p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S \\
 &\times \{H(x_0 \in (H \cup B)) \hat{w}_{out} + H(x_0 \notin (H \cup B)) \dots\} \\
 &\times \{H(x_2 \notin B^+) \hat{w}_{out} + H(x_2 \in B^+) \dots\}
 \end{aligned}$$

## Modèle direct : Description de l'algorithme de Monte Carlo



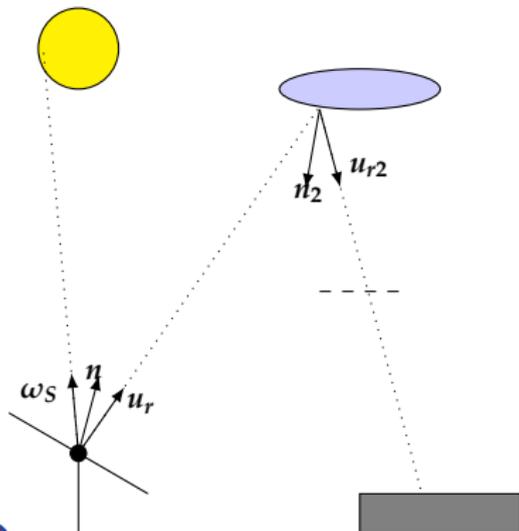
$$\begin{aligned}
 A &= \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx \int_{\mathcal{S}} p_{\Omega_{\mathcal{S}}}(\omega_S) d\omega_S \\
 &\times \{H(x_0 \in (H \cup B)) \hat{w}_{out} + H(x_0 \notin (H \cup B)) \dots\} \\
 &\times \{H(x_2 \notin B^+) \hat{w}_{out} + H(x_2 \in B^+) \dots\}
 \end{aligned}$$

## Modèle direct : Description de l'algorithme de Monte Carlo



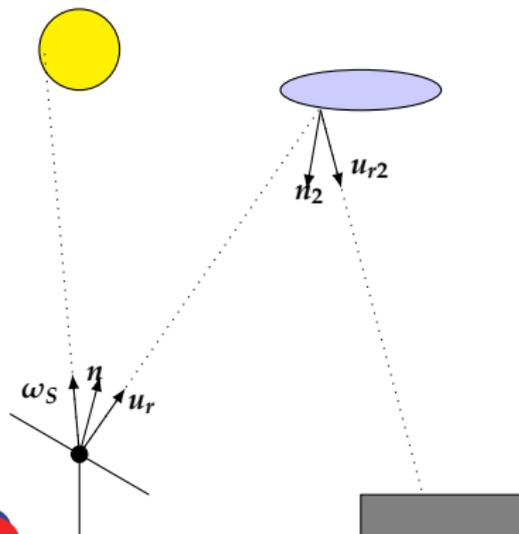
$$\begin{aligned}
 A &= \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx \int_S p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S \\
 &\times \{H(x_0 \in (H \cup B)) \hat{w}_{out} + H(x_0 \notin (H \cup B)) \dots\} \\
 &\times \{H(x_2 \notin B^+) \hat{w}_{out} + H(x_2 \in B^+) \dots\}
 \end{aligned}$$

## Modèle direct : Description de l'algorithme de Monte Carlo



$$\begin{aligned}
 A = & \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx \int_S p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S \\
 & \times \{H(x_0 \in (H \cup B)) \hat{w}_{out} + H(x_0 \notin (H \cup B)) \dots \\
 & \times \{H(x_2 \notin B^+) \hat{w}_{out} + H(x_2 \in B^+) \\
 & \times \{H(x_3 \notin C^+) \hat{w}_{out} + H(x_3 \in C^+) \hat{w}_{in}\}\}
 \end{aligned}$$

## Modèle direct : Description de l'algorithme de Monte Carlo



$$\begin{aligned}
 A = & \int_{\mathcal{H}^+} p_{X_1}(x_1) dx \int_{\mathcal{S}} p_{\Omega_S}(\omega_S) d\omega_S \\
 & \times \{H(x_0 \in (H \cup B)) \hat{w}_{out} + H(x_0 \notin (H \cup B)) \dots \\
 & \times \{H(x_2 \notin B^+) \hat{w}_{out} + H(x_2 \in B^+) \\
 & \times \{H(x_3 \notin C^+) \hat{w}_{out} + H(x_3 \in C^+) \hat{w}_{in}\}\} \}
 \end{aligned}$$

## Une centrale simplifiée

- 65 miroirs plans de 3m de coté ;
- Champ hémisphérique ;
- Paramètres de l'optique beam down obtenus aléatoirement ;
- 21 Mars à 12h,  $DNI = 1000W \cdot m^{-2}$  ;

## Une centrale simplifiée



## Des résultats mitigés

- Puissance reçue au récepteur : 2377W ;
- Ombrage : 10% ;
- Blocage : 47% ;
- Pertes par débordement : 40% ;

1 Introduction

2 Optimisation des centrales solaires

3 Le type de centrale : beam down

4 Le modèle direct

**5 L'optimisation multi-critère**

6 Sensibilités géométriques et méthodes de Monte Carlo

7 Conclusion et perspectives

## Une approche hybride

- Utilisation d'un algorithme évolutionnaire type essaim de particules (PSO : Particle Swarm Optimization) ;
- Couplage avec une méthode de descente de gradient avec les sensibilités de la grandeur aux paramètres géométriques ;
- Bénéfice de la méthode stochastique pour s'affranchir des optimums locaux ;
- Ajout d'information sur le comportement du système grâce aux sensibilités : accélération de la convergence vers l'optimum ;

## PSO

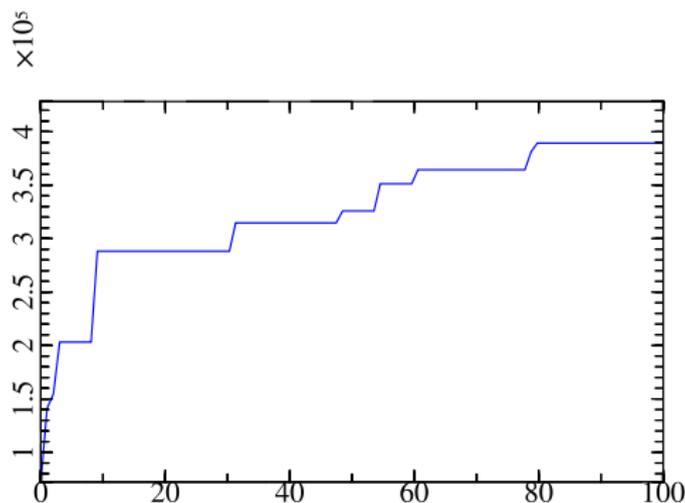
- Technique d'optimisation stochastique ;
- Une particule représente une configuration pour la centrale ;
- Les valeurs des paramètres sont générées aléatoirement à l'itération 0 ;
- Aux itérations suivantes, les valeurs sont obtenues en combinant les résultats de la meilleure particule de l'essaim et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

## Application du PSO

- 100 itérations pour 10 particules ;
- Maximisation d'une fonction objectif simple
$$f = \text{Puissance} - 10000 \times \text{Shading} - 10000 \times \text{Spillage}$$
- Paramètres :
  - Rayon de chaque rangée d'héliostats ;
  - Taille des miroirs par rangée ;
  - Forme de l'optique beam down ;

## Application du PSO

### Fonction Objectif

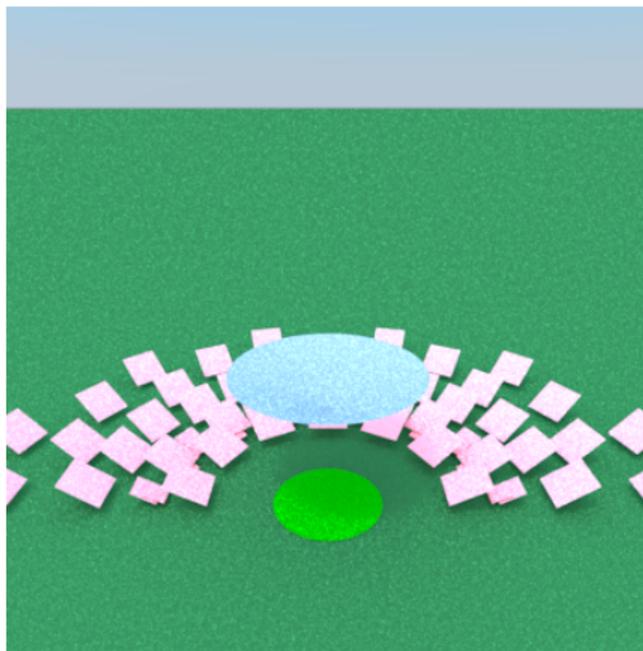


## Application du PSO

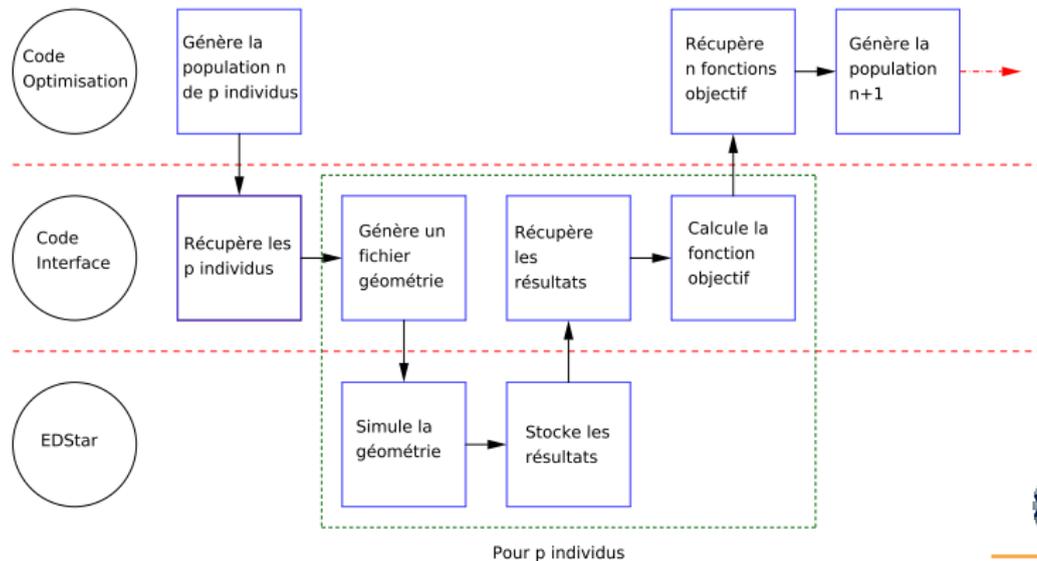
### Évolution des résultats :

- Puissance reçue au récepteur : 389 407W (contre 2377W) ;
- Ombrage : 4% (contre 10%) ;
- Blocage : 21% (contre 47%) ;
- Pertes par débordement : 15% (contre 40%) ;
- 100 000 réalisations par particule ;
- Temps de calcul : 11min30s (PC de bureau avec AMD Phenom X6) ;

## Application du PSO Installation optimisée



## Organisation des différentes parties du code



1 Introduction

2 Optimisation des centrales solaires

3 Le type de centrale : beam down

4 Le modèle direct

5 L'optimisation multi-critère

6 Sensibilités géométriques et méthodes de Monte Carlo

7 Conclusion et perspectives

## Un seul algorithme de Monte Carlo

- Estimation simultanée de la grandeur  $A$  et de ses sensibilités  $\partial_{\pi_i} A$  par rapport à des paramètres  $\pi_i$  ;

$$A = \int_{D_X} p_X(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \int_{D_Y} p_Y(\mathbf{y}|\mathbf{x}) d\mathbf{y} \hat{w}(\mathbf{x}, \mathbf{y}; \pi)$$

$$\partial_{\pi} A = \int_{D_X} p_X(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \int_{D_Y} p_Y(\mathbf{y}|\mathbf{x}) d\mathbf{y} \hat{w}_{\pi}(\mathbf{x}, \mathbf{y}; \pi)$$

- Algorithme sur la grandeur est très peu modifié ;
- Le temps de calcul supplémentaire est très faible : utilisation des mêmes lois de tirages pour les variables aléatoires ;



## Sensibilités paramétriques

- Dans le cas des sensibilités *paramétriques* :
  - Pas de difficulté majeure, on dérive le poids du Monte Carlo selon le paramètre  $\pi$  ;
  - Le paramètre  $\pi$  n'apparaît pas dans les bornes d'intégration ni dans les fonctions « test » à l'intérieur de l'algorithme ;
  - Par dérivation des termes dépendant du paramètre  $\pi$ , on obtient l'expression de la sensibilité voulue ;

## Sensibilités géométriques

- Dans le cas des sensibilités *géométriques* :
  - Des difficultés apparaissent dues à la dépendance au paramètre  $\pi$  :
    - des bornes du domaine d'intégration ;
    - des fonctions de « test » (fonction de Heaviside) ;
  - pour le premier cas, une méthode a été mise au point précédemment par :
    - Introduction d'un champ de vitesse de déformation du domaine ;
    - Les résultats sont obtenus par un travail de reformulation mathématique sur les expressions ;
  - Pour le deuxième cas, le travail mathématique demandé, en plus d'être fastidieux, peut ne pas aboutir ;

## Un modèle de sensibilité appliqué aux méthodes de Monte Carlo

- Nous raisonnons localement ;
- Au lieu de chercher à exprimer la grandeur mesurée et sa sensibilité dans le même algorithme, on va poser un modèle sur la grandeur et un modèle sur la sensibilité ;
- La difficulté se reporte sur la recherche des conditions aux limites pour le modèle de sensibilité ;
- Cette approche nécessite 2 algorithmes de Monte Carlo ;

- 1 Introduction
- 2 Optimisation des centrales solaires
- 3 Le type de centrale : beam down
- 4 Le modèle direct
- 5 L'optimisation multi-critère
- 6 Sensibilités géométriques et méthodes de Monte Carlo
- 7 Conclusion et perspectives

## Travail accompli

- Code de Monte Carlo réalisé ;
- Bibliothèque PSO codée en C++ et benchmark à partir de fonctions tests ;
- Géométries plus complexes pour les héliostats ;
- Agencements de champ réalistes ;

## Perspectives

- Simuler les géométries réalistes ;
- Finaliser le travail théorique sur les sensibilités géométriques ;
- Intégrer le calcul de sensibilités à la boucle d'optimisation ;



TOTAL



ECOLE DES MINES D'ALBI  
C A R M A U X

**Merci de votre attention**

