



**HAL**  
open science

## Clé de Sol

Emmanuel Guillot, William Baltus, Marina Casanova, Mohammed Haddach,  
Anita Haeussler, Antoine Perez, Jean-Louis Sans, Magali Servel, Régis  
Rodriguez

► **To cite this version:**

Emmanuel Guillot, William Baltus, Marina Casanova, Mohammed Haddach, Anita Haeussler, et al..  
Clé de Sol. JNES 2022, Jun 2022, Albi, France. 2022. hal-04845099

**HAL Id: hal-04845099**

**<https://cnrs.hal.science/hal-04845099v1>**

Submitted on 18 Dec 2024

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

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



# Clé de Sol



Emmanuel Guillot, William Baltus, Marina Casanova, Mohamed Haddach, Anita Haussler, Antoine Perez, Jean-Louis Sans, Magali Servel, Régis Rodriguez  
PROMES-CNRS (UPR8521) – Centre Felix Trombe — 7 rue du four solaire 66120 FONT ROMEU ODEILLO VIA, France  
emmanuel.guillot@promes.cnrs.fr

Plus d'infos projet sur <https://www.promes.cnrs.fr/cle-de-sol/>



Le projet FEDER CLÉ-DE-SOL (2021-2022, 1 M€) a pour objectif la **maitrise du flux solaire concentré** et de la **température au foyer** de la centrale à tour **Thémis** et du **four solaire de 1000 kW à Odeillo**. Ces deux sites sont exploités par le laboratoire PROMES du CNRS et font partie de l'infrastructure nationale FR-SOLARIS.

## Centrale à tour de THÉMIS

107 héliostats paraboliques,  
soit 5800 m<sup>2</sup> de miroirs  
Angles incidents de 20 à 60°

**Foyer principal**  
jusqu'à 4500 kW<sub>th</sub>  
jusqu'à 3600 kW/m<sup>2</sup>  
récepteur < 6.5 x 5m

**Foyer secondaire**  
jusqu'à 400 kW<sub>th</sub>  
jusqu'à 600 kW/m<sup>2</sup>  
récepteur < 1.5 x 1.5 m



## Grand Four d'Odeillo

63 héliostats plans, soit 2835 m<sup>2</sup>  
Angles incidents de 10 à 80°  
Parabole de 1830 m<sup>2</sup>  
et 18m de focale

**Au foyer**  
jusqu'à 1000 kW<sub>th</sub>  
jusqu'à 10000 kW/m<sup>2</sup>  
récepteur < 1.2 x 1.2 m

11 autres fours solaires  
de 1 à 6 kW<sub>th</sub> — de 6000 à 16000 kW/m<sup>2</sup>  
1 micro-centrale parabolique 200 kW<sub>th</sub> + thermocline  
1 parabole de 52 kW<sub>th</sub> et 9500 kW/m<sup>2</sup>

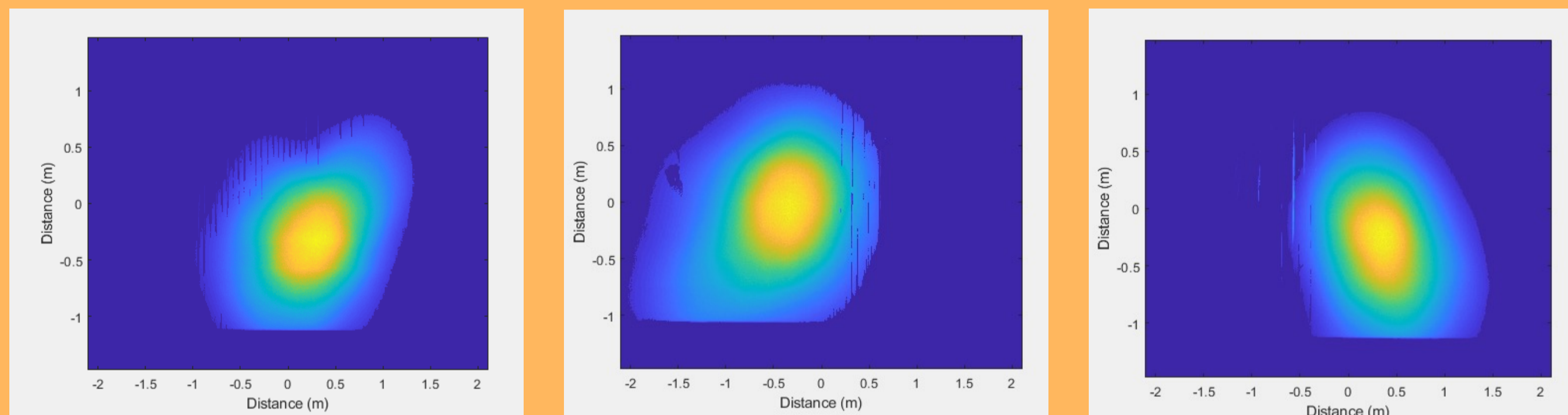
L'objectif principal du projet FEDER CLÉ-DE-SOL est de développer des solutions originales permettant de délivrer un **flux solaire concentré à la fois intense et de répartition spatiale et temporelle maîtrisée** à la demande et de les tester sur les installations solaires de Thémis et du Grand Four d'Odeillo.

Cela permettra de **multiplier les possibilités de tests en conditions réelles et à échelle industrielle** des récepteurs et procédés solaires à haute température et haut rendement, et d'améliorer la qualité de ces tests. 4 principales actions interdépendantes sont prévues.

### Action 1 Base de données fluxmétrique pour chaque héliostat

- ✓ Thémis
- ✓ Grand Four

La contribution énergétique au foyer **dépend de chaque héliostat (position, état optique réel), de sa direction de tir, et de la position du soleil**.  
La modélisation par **lancer de rayons** permet d'approcher ces évolutions, mais est limitée en exactitude car trop dépendante d'une connaissance très fine de l'optique et de ses défauts : position millimétrique de chaque miroir, de leur déformation micrométrique, des défauts comme les salissures...  
D'un autre côté, les différents systèmes de **mesures par caméra et radiomètres** nécessitent beaucoup de temps pour enregistrer, traiter et analyser l'évolution des contributions héliostats. Les instruments doivent être spécialement développés pour nos installations aux caractéristiques atypiques.  
Cette action du projet vise à mesurer l'énergie concentrée d'héliostats à un **échantillonnage représentatif**, pour ensuite établir une **base de données interpolée la plus générale possible**. Une base donnée a été constituée au Grand Four mais invalidée, et les mesures sont en cours à Thémis.



Thémis : 3 héliostats différents, même focale, même moment => puissance et concentration quasi identique, mais forme de la tâche concentrée différente

Fluxmétrique par caméra sur cible blanche : luminance

Étalonnage radiométrique par calorimètre ou radiomètre type Gardon  
Puissance en kW/m<sup>2</sup>

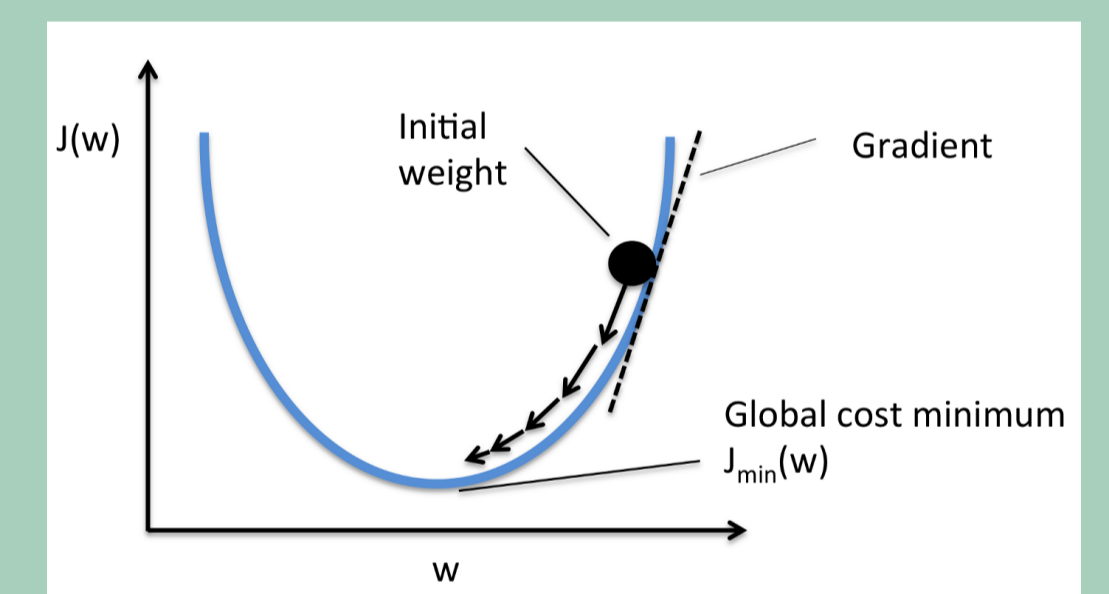
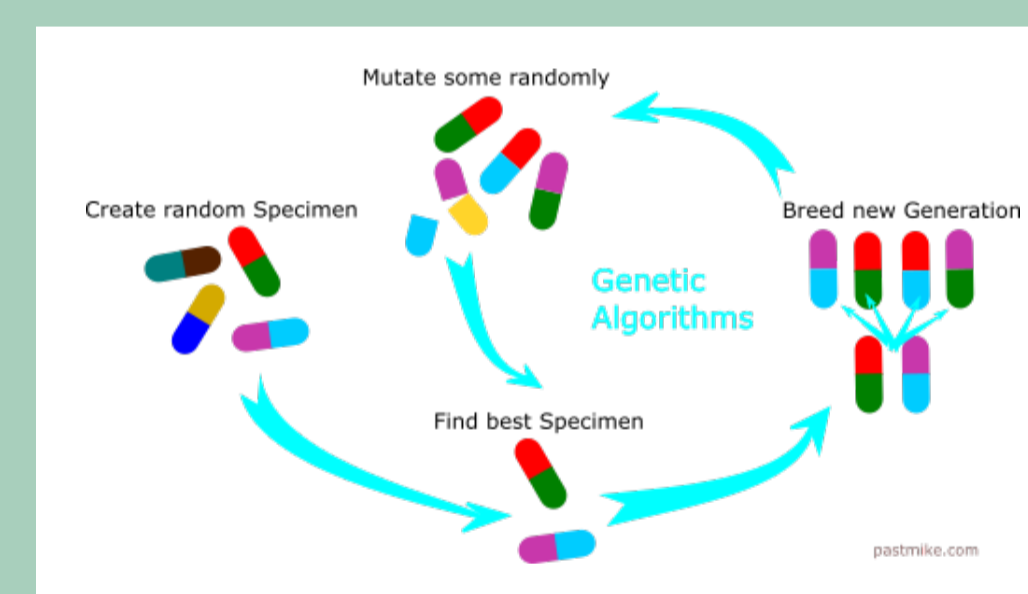
À Thémis : barre blanche rapide mobile balayant devant le récepteur solaire.  
Radiomètre ultra rapide intégré pour l'étalonnage.

À Odeillo : cible blanche fixe installée au foyer à la place du récepteur du procédé testé.  
Radiomètre intégré à la cible. Mesures alternées par calorimétrie haute précision.

### Étude et définition de stratégies de tir des héliostats Action 2

- ✓ Thémis
- ✓ Grand Four

Chaque procédé en test nécessite un niveau de puissance et une distribution de puissance adaptés aux conditions recherchée : pour chaque cas étudié (jusqu'à une dizaine par projet), il faut **choisir le nombre d'héliostats, quels héliostats, et à quelle direction** on envoie leur faisceau. L'assemblage de chaque tâche concentrée permet de **dessiner à volonté la quantité et la répartition de l'énergie** sur le récepteur solaire.  
Pour les cas de basse puissance et de répartition simple, jusqu'à une dizaine d'héliostats, une approche manuelle par un expert est possible.  
À forte puissance, ou en cas de cavité, ou de répartition de l'énergie complexe (gradients sur le récepteur...), il est nécessaire d'exploiter une stratégie d'optimisation de tir des héliostats : c'est l'objectif de l'action 2.



Au Grand Four Solaire, où en première approche le système est invariant temporel mais fortement dépendant des angles de tir héliostat et de l'héliostat, une optimisation par **algorithme génétique** a été développée, implémentée et testée.

Pleinement satisfaisante lors des simulations, les tests de validation expérimentaux ont été décevants début 2022 car la base de donnée fluxmétrique pour chaque héliostat pour chaque direction de tir (action 1, 2021) s'est révélée trop imparfaite et devrait être renouvelée : influence du vent sous estimée, limite des techniques d'interpolation utilisées.

Pour la Tour Solaire de Thémis : en première approche le système est invariant selon les angles de tir héliostat mais fortement dépendant de la position du soleil et de l'héliostat, il s'avère continu et dérivable, contrairement au comportement au grand four.

Une optimisation par **descente de gradient** est applicable et a déjà été éprouvée pour le projet européen NextCSP en 2021. La généralisation de cette approche est à valider pour différents types de récepteurs et le champ complet des 107 héliostats. Il faudra notamment implanter le code pour exploiter la base de données et appliquer le code d'optimisation d'objectif de distributions de flux.

### Action 3 Amélioration de la performance des héliostats de Thémis

- ✓ Thémis

Afin de pouvoir piloter de façon fiable, rapide et précise les 107 héliostats de Thémis pour appliquer les coordonnées de tir obtenues après optimisation (action 2), il est nécessaire d'améliorer le pilotage des héliostats vis-à-vis du système PEGASE actuellement en place.  
Le nouveau système développé dans cette action 3 se base sur l'existant, soit modernisé (cartes CPU, logiciels de pilotage...), soit remplacé. En premier lieu, le lien de communication, aujourd'hui par radio à trop faible bande passante, va être remplacé par **une connexion filaire par fibre optique Ethernet**. Ce nouveau lien à faible latence (~1ms) et grande bande passante (> 1000 Mbits) permettra un **contrôle à grande dynamique** des héliostats (de l'ordre de quelques secondes, limité par la mécanique), tout en conservant la précision actuelle (~décimétrique).

Ces performances se rapprocheront des performance du grand four solaire d'Odeillo : son champ d'héliostats a été modernisé via l'Equipex SOCRATE, et permet aujourd'hui un pilotage à 5 Hz et des mouvements de l'ordre de 1 Hz avec une précision sub-centimétrique.

Afin d'améliorer la précision et la répétabilité de tir solaire des héliostats de Thémis, une rénovation mécanique des 72 héliostats non encore améliorés sera également conduite (les autres ayant été modifiés au fil des 15 dernières années par le PROMES-CNRS depuis qu'il exploite le site).

### Mesure thermographique sous flux solaire concentré Action 4

- ✓ Thémis
- ✓ Grand Four

Lors des tests expérimentaux des procédés solaires, il est primordial de suivre avec la plus grande connaissance et précision possible le comportement du récepteur solaire : ce composant est la voûte du système, tout gain de performance a un fort impact sur le rendement général.  
Indépendamment du procédé en test (choix du caloporteur pour la production électrique, synthèse chimique de matériaux, tests de composants en conditions extrêmes...) la température de la surface irradiée est l'information cruciale mais difficile à obtenir car les mesures sont perturbées par le flux solaire concentré qui servent à le chauffer : de 10 à 16000 kW/m<sup>2</sup>, pour des températures opérationnelles de l'ambiant à plus de 3500 °C.  
L'action 4 vise à doter le laboratoire PROMES-CNRS d'une **caméra infrarouge et d'un ensemble d'optiques et filtres spectraux** adaptés aux conditions de tests sur les installations solaires. La difficulté première est le compromis coût — résolution spatiale — incertitude thermique, lié notamment au choix des bandes spectrales : il est nécessaire d'observer le rayonnement thermique du récepteur solaire dans des bandes spectrales où il n'est pas perturbé par la réflexion du flux solaire concentré par les héliostats ou la parabole (mesures « solar blind »), ni par des fluctuations de l'**atmosphère** (humidité, CO, CO<sub>2</sub>...), ou encore la dégradation des revêtements absorbants (contrôle envisagé par mesures **hyperspectrales**).

Figure 1-1 Blackbody spectral radiant emittance

Longueur d'onde (microns)