



## Thèse

### **Etude d'un récepteur solaire monotube pour centrale CSP en carbure de silicium associé à un écoulement fluide-particule : expérimentation, modélisation et contrôle-commande**

**Durée : 3 ans à partir de 10/2024**

Laboratoire PROMES (Procédé Matériaux et Energie Solaire)

Le laboratoire PROMES, spécialiste reconnu dans le domaine de la conversion de l'énergie solaire à concentration, recherche un doctorant ou une doctorante ayant des compétences dans les domaines suivants : génie des procédés, modélisation numérique, transferts de chaleur, contrôle/commande, apprentissage automatique.

#### **Contexte scientifique**

La thèse se déroulera au laboratoire PROMES, sur le site d'Odeillo, dans le contexte du projet ANR SiCSun.

Le projet SiCSun a pour objectif d'apporter la preuve de concept d'un récepteur solaire (RS) en carbure de silicium (SiC) mettant en œuvre des particules comme fluide caloporteur ou milieu réactif (voir schéma de principe ci-après). Il a également pour ambition d'étudier les enjeux scientifiques et technologiques associés au développement de cette innovation. Il s'agit en particulier de développer des outils de conception, de contrôle/commande et de maintenance prédictive pour la maîtrise des transferts thermiques pariétaux, des écoulements gaz-particules et des contraintes thermomécaniques.

Le projet SiCSun traite de la conversion thermique à haute température de l'énergie solaire par des concentrateurs optiques et, en particulier, de l'élément clé du procédé de conversion : le récepteur solaire (RS). Les technologies solaires à concentration (CST) permettent la production de chaleur dans la gamme de température 150 - 3000 °C mais, commercialement, cette gamme est limitée à 150 – 560 °C. L'exploitation de la fraction haute de cette gamme de températures (400 - 560 °C) a conduit au développement commercial de centrales solaires thermodynamiques (CSP) – 6,5 GW installés dans le monde à ce jour – ayant des rendements similaires à ceux des centrales PV avec l'avantage d'un stockage thermique massif autorisant la production d'électricité à pleine puissance pendant plus de 10 h. Néanmoins, la production d'électricité n'est pas la seule application possible et souhaitable des CST. En effet, ces technologies produisant d'abord de la chaleur avec un bon rendement (de 50 à 70 %), elles sont applicables à la production de chaleur industrielle (70 % de la consommation d'énergie dans l'industrie) et de combustibles verts tels que l'hydrogène et le gaz de synthèse (H<sub>2</sub> + CO). Élargir le champ des applications des technologies CST nécessite d'augmenter la température de fonctionnement des RS et de transférer cette chaleur à un fluide stable et stockable. Pour les centrales solaires, une augmentation de la température du fluide en sortie du RS de 560 à 750 °C permet une augmentation relative du rendement du cycle thermodynamique de 20 % (de 42 à 50 % avec un cycle sCO<sub>2</sub>). Pour la production de chaleur industrielle, de nombreuses réactions très endothermiques se produisent à environ 900 °C, calcination et cracking par exemple.

Le projet SiCSun propose de concevoir et de tester un RS en carbure de silicium (SiC) capable de chauffer des particules entre 900 et 1000 °C.

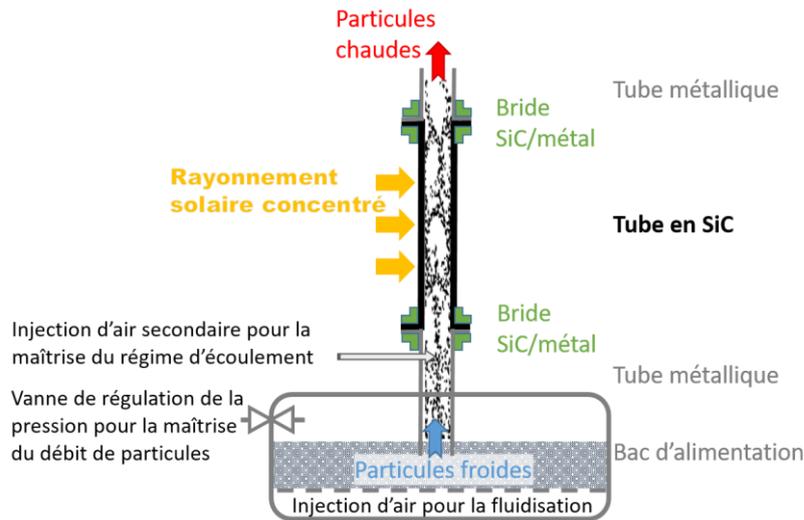
## Description des travaux

Les travaux du doctorant ou de la doctorante s'inscriront dans la tâche 2 du projet SiCSun qui traite de la conception d'un prototype de RS tubulaire en SiC dans lequel circule un lit fluidisé de particules en phase dense. Dans le but d'optimiser le fonctionnement du RS, ce qui implique de maîtriser le régime d'écoulement des particules, une stratégie de pilotage associant commande MPC (pour model-based predictive control) et apprentissage par renforcement sera développée afin de contrôler les fluctuations de la perte de charge dans le tube.

Le doctorat concernera les deux parties décrites ci-après.

### **Première partie « Mise en place du prototype de RS en SiC »**

Dans ce travail, le RS se limite à un tube unique (RS monotube). Le principe de fonctionnement du dispositif est le suivant. Le tube absorbeur est plongé dans un bac fluidisé dont la pression est contrôlée par une vanne. L'accroissement de la pression dans le bac d'alimentation permet de faire monter les particules dans le tube jusqu'à l'établissement d'une circulation continue en régime dense.



*Schéma de principe du prototype de RS*

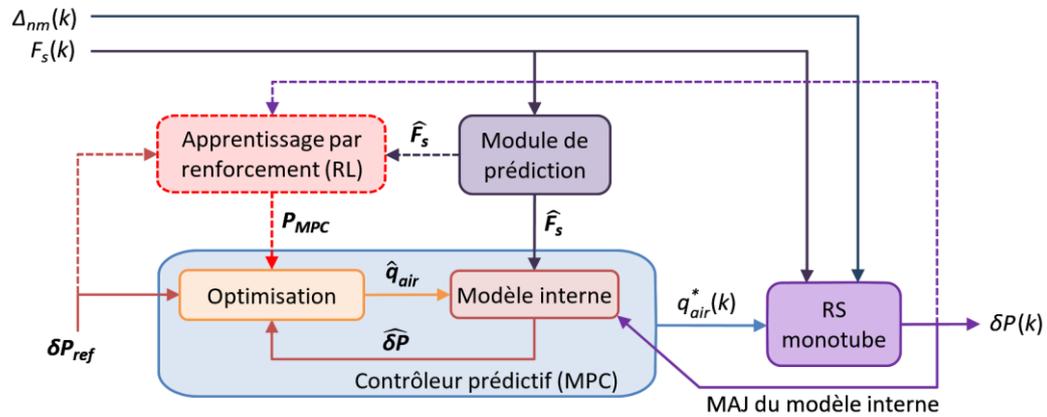
Le dispositif sera instrumenté pour mesurer le flux solaire, les débits d'air et de particules, les températures et les déformations mécaniques (élongation et flèche) afin de caractériser et de comprendre les phénomènes physiques mis en jeu. Les températures au sein de l'écoulement seront mesurées par des thermocouples et les températures en face insolée par caméra IR.

La personne recrutée mettra en place le banc expérimental avec l'aide, notamment, du personnel du SISIA (Service des Installations Solaires et Instruments Associés). Elle mènera à bien les expérimentations et exploitera les mesures obtenues pour différentes conditions opératoires (flux solaire, débits d'air et de particules, température d'entrée des particules). Ceci devra permettre de déterminer l'efficacité thermique d'un RS en SiC tubulaire à particule, d'identifier des coefficients de transfert de chaleur à la paroi et de comprendre le comportement physique (thermique et dynamique) du système, notamment en matière de temps de réponse. Ce dernier point permettra le développement et la validation d'un modèle macroscopique, mis à profit pour le contrôle avancé du RS, ce qui fait l'objet de la deuxième partie des travaux de la thèse.

### **Deuxième partie « Modélisation et contrôle/commande d'un RS monotube »**

Maîtriser l'écoulement des particules est essentiel, dès lors qu'il s'agit d'optimiser le fonctionnement du RS. La stratégie de contrôle, qui mettra à profit un modèle de RS à un seul tube (monotube), est définie comme suit : les fluctuations de perte de charge du tube  $\delta P$  seront asservies à une consigne par le biais du débit d'air injecté dans le tube  $q_{air}$  (aération secondaire), influant de fait sur le régime d'écoulement des particules. La mise en œuvre de cette stratégie, qui sera évaluée en simulation puis

validée grâce au prototype de RS en SiC, passe par la synthèse d'un contrôleur MPC qu'il sera possible de paramétrer grâce à l'apprentissage par renforcement (ou RL, pour reinforcement learning) et dont il conviendra de maîtriser le coût calculatoire.



*Contrôle prédictif d'un RS monotube, avec (ou sans) paramétrage du contrôleur par apprentissage par renforcement (RL) et prédiction du flux solaire concentré reçu.*

La thèse portera sur le développement d'un modèle macroscopique de RS monotube à partir des données disponibles au laboratoire et sur la mise en œuvre, en simulation, d'une première stratégie de contrôle/commande fondée sur les outils classiques de l'automatique – un contrôleur proportionnel-intégral-dérivé ou fondé sur des règles sera développé – afin de contrôler les fluctuations de la perte de charge dans le tube. Cette stratégie fournira des performances de référence et permettra l'évaluation du contrôleur MPC, éventuellement paramétré par apprentissage par renforcement.

### **Profil recherché :**

Titulaire d'un Master 2 ou d'un diplôme d'ingénieur, spécialisé en énergie ou physique avec un goût prononcé pour :

- les travaux expérimentaux,
- le travail de recherche en laboratoire,
- l'approche pluridisciplinaire du sujet : thermique, contrôle-commande, apprentissage automatique.

En fonction du profil et des compétences du candidat (thermique/énergétique ou contrôle-commande), les travaux de thèse pourront mettre l'accent sur l'une ou l'autre des deux parties décrites précédemment.

### **Candidature :**

Démarrage de la thèse : octobre 2024.

Lieu principal de travail : laboratoire PROMES, site du four solaire d'Odeillo. 66120 Font-Romeu

Envoyer CV + lettre de motivation avant le 8 juillet à :

Stéphane Grieu, [stephane.grieu@promes.cnrs.fr](mailto:stephane.grieu@promes.cnrs.fr)

Quentin Falcoz, [quentin.falcoz@promes.cnrs.fr](mailto:quentin.falcoz@promes.cnrs.fr)

Reine Reoyo-Prats, [reine.reoyo@promes.cnrs.fr](mailto:reine.reoyo@promes.cnrs.fr)