



## Stage Ingénieur ou Master 2

### Récepteurs solaires en carbure de silicium pour centrales solaires thermodynamiques : conception, modélisation et contrôle/commande

**Durée : 6 mois (ou 4 mois minimum) à partir de 02/2024**  
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 stagiaire pour une durée de 6 mois ayant des compétences dans les domaines suivants : génie des procédés, modélisation numérique, transferts de chaleur, contrôle/commande, apprentissage automatique.

Le recrutement du stagiaire s'inscrit dans la volonté de poursuivre les travaux en doctorat.

#### **Contexte scientifique**

Le stage se déroulera au laboratoire PROMES, site de Perpignan, 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 %) 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.

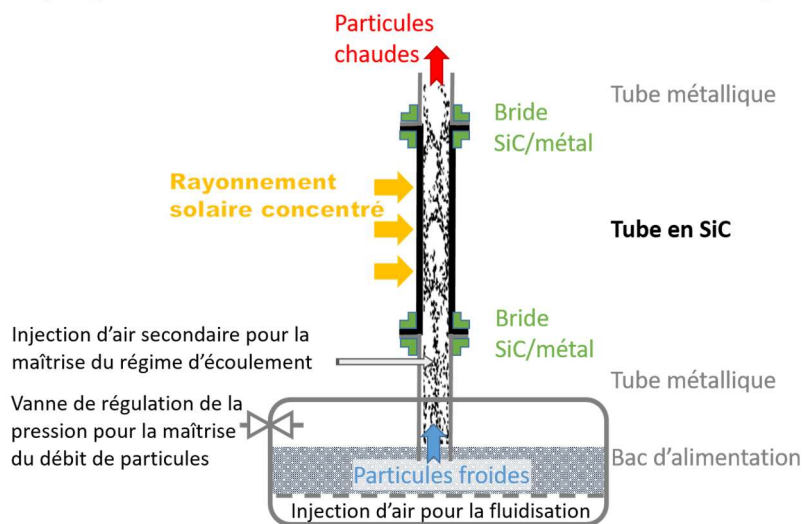
## Description des travaux

Les travaux du stagiaire 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 stage concernera les deux sous-tâches suivantes. En fonction des compétences et du profil du candidat (plutôt génie thermique ou plutôt contrôle/commande) le stagiaire pourra insister sur l'une de ces deux sous-tâches.

### **Sous-tâche « Conception 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.

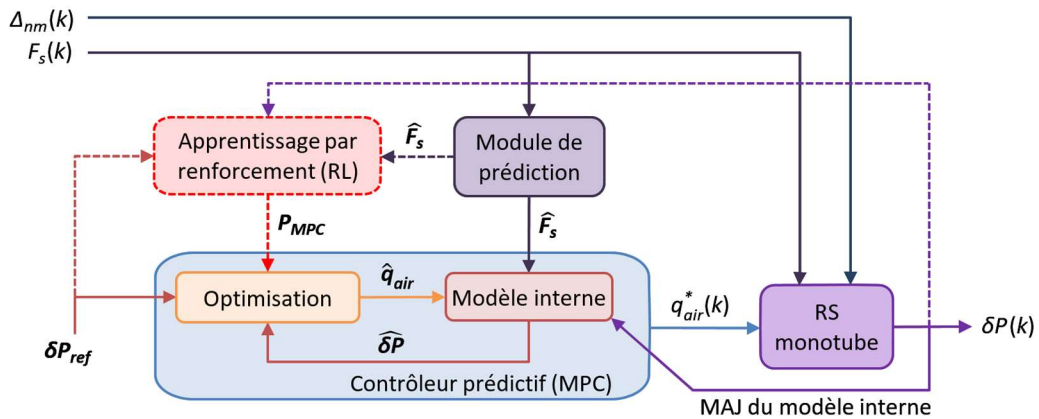


*Schéma de principe du prototype de RS*

L'objectif en phase de conception est de déterminer la forme du récepteur permettant de minimiser les contraintes thermomécaniques et ainsi minimiser la probabilité de rupture. Pour cela, une étude paramétrique (en partie en 2D) sera réalisée à l'aide du logiciel Code\_Aster. Elle portera sur l'épaisseur du tube en SiC, sa forme (le processus de fabrication peut imposer une forme extérieure polygonale) et la position de la zone de l'écoulement dans la section du tube. On envisage de tester des épaisseurs variant entre 6 et 12 mm, des formes hexagonale ou octogonale et une position de la section fluide centrée, décentrée vers ou éloignée de la face insolée du RS.

### **Sous-tâche « 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.*

Le stage 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.

### **Candidature :**

Démarrage du stage début février 2024.

Envoyer CV + lettre de motivation 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, [reine.reoyo@univ-perp.fr](mailto:reine.reoyo@univ-perp.fr)