

Développement et validation expérimentale (MicroSol-R) d'algorithmes pour le contrôle-commande avancé des centrales solaires à collecteurs cylindro-paraboliques équipées de systèmes de stockage

Stéphane Grieu (grieu@univ-perp.fr), Julien Eynard (julien.eynard@univ-perp.fr) et Stéphane Thil (stephane.thil@univ-perp.fr), PROMES-CNRS, Université de Perpignan Via Domitia (UPVD)

1. Contexte

Le déploiement à grande échelle des centrales solaires à concentration équipées de systèmes de stockage thermique passe, notamment, par le développement de stratégies de contrôle-commande avancé permettant, d'une part, d'exploiter au mieux la ressource solaire disponible et, d'autre part, de gérer efficacement les systèmes de stockage. Ainsi, PROMES-CNRS a pour ambition d'accompagner ce déploiement et de répondre aux besoins formulés par les industriels œuvrant dans le domaine par le développement de stratégies fondées sur la théorie de la commande prédictive (ou MPC, pour *Model-based Predictive Control*), les outils de l'apprentissage automatique/profond (un sous-domaine de l'intelligence artificielle) étant par ailleurs mis à profit, tant pour le développement de modèles que la prévision de perturbations (par exemple, la variabilité de la ressource solaire).

MicroSol-R, une plateforme de recherche permettant l'étude de composants innovants destinés aux centrales solaires à concentration, permettra de mener à bien les travaux prévus. La microcentrale solaire (d'une puissance de 150 kW_{th}) est équipée de collecteurs cylindro-paraboliques (deux modules orientés Est-Ouest, un module orienté Nord-Sud) et d'un système de stockage de type thermocline ; sa capacité est de 220 kWh, ce qui correspond à une production d'1h30, pour une puissance thermique de 140 kW). Un système de stockage conventionnel (deux cuves) complète l'installation (20 minutes de production, pour une puissance thermique identique). Grâce au rayonnement solaire concentré, l'installation produit de la chaleur. Une micro-turbine (de 15 kW) produit de l'électricité, à partir de cette chaleur, par la mise en œuvre d'un cycle thermodynamique (un cycle de Rankine organique).

PROMES-CNRS, par l'intermédiaire de la thèse proposée, développera et validera, dans un premier temps en simulation puis expérimentalement (grâce à MicroSol-R), des algorithmes pour le contrôle-commande avancé des centrales solaires à collecteurs cylindro-paraboliques équipées de systèmes de stockage thermique et de générateurs d'appoint. La stratégie que développera PROMES-CNRS aura pour objectif premier d'optimiser les performances des centrales par la gestion prédictive des systèmes de stockage et des générateurs d'appoint (dont il conviendra de limiter autant que possible l'utilisation, dès lors que ces générateurs utilisent de l'énergie fossile) et de compenser une baisse de la production.

2. Modélisation de l'installation

La mise en œuvre d'une stratégie fondée sur la théorie de la commande prédictive requiert d'une part, un modèle dynamique du système à contrôler et, d'autre part, des algorithmes pour la prévision des perturbations que ce dernier subit. Des travaux traitant de la modélisation de la microcentrale solaire MicroSol-R (les collecteurs cylindro-paraboliques, le thermocline, le générateur de vapeur, la micro-turbine) ayant été menés au laboratoire PROMES-CNRS au cours , ces travaux seront mis à profit pour le développement d'un modèle dynamique, dont il conviendra de maîtriser le coût calculatoire afin de ne pas pénaliser l'implémentation en temps réel de la stratégie proposée (la résolution du problème d'optimisation), ayant vocation à être utilisé comme modèle interne de la structure de commande prédictive. Si nécessaire, une réduction/simplification de modèle sera réalisée par le/la doctorant(e) recruté(e). Les outils de l'apprentissage automatique/profond pourraient être utilisés.

3. Prévision multi-horizon de l'éclairement normal direct

La principale perturbation subie par le système (MicroSol-R) est la variabilité de la ressource solaire. La variabilité de l'éclairement normal direct (ou DNI, pour *Direct Normal Irradiance*) – la composante du

rayonnement solaire, mesurée sous incidence normale, n'ayant pas interagi avec l'atmosphère lors de son trajet jusqu'à l'observateur – est importante, ce qui en rend la prévision particulièrement difficile. PROMES-CNRS développe depuis plusieurs années des algorithmes, notamment fondés sur les outils de l'apprentissage automatique/profond, pour la prévision, tant infra-horaire qu'infra-journalière, du DNI. Ces travaux ont notamment montré que l'éclairement normal direct pouvait se scinder en deux composantes : l'une déterministe (l'éclairement par ciel clair), l'autre stochastique (l'indice « ciel clair », qui traduit l'atténuation du DNI causée par la présence de perturbations atmosphériques).

Le/la doctorant(e) recruté(e) prendra la suite des travaux susmentionnés et développera des algorithmes – il conviendra d'en maîtriser le coût calculatoire – pour la prévision multi-horizon du DNI, tirant profit, d'une part, de mesures et d'autre part, d'observations atmosphériques. Ainsi une caméra à grand angle de champ avec pyranomètre intégré (la version 2.0 du PROMES Sky Imager) sera installée à proximité immédiate de la microcentrale. Le PROMES Sky Imager génère des images du ciel à haute résolution spatio-temporelle et à haute dynamique (ou HDR, pour *High Dynamic Range*), préservant notamment l'information dans la région circumsolaire (cette information, fondamentale dans l'optique d'une prévision du DNI, renseigne sur sa variabilité à court terme). Seront développés par le/la doctorant(e) recruté(e) des algorithmes à coût calculatoire maîtrisé pour :

- la prévision infra-horaire du DNI ; ces algorithmes combineront modèle de connaissance (pour la prévision de l'éclairement par ciel clair à partir de « mesures » du DNI obtenues par l'application du brevet d'invention FR1758549/WO2019053232 déposé par le CNRS en 2017) et modèle fondé sur l'apprentissage automatique/profond (pour la prévision à partir des images HDR de l'indice « ciel clair ») ; la prévision de l'indice « ciel clair » requiert, notamment, la détection des masses nuageuses et l'estimation de leur déplacement (direction et vitesse) afin d'identifier, sur les images, la (les) zone(s) d'intérêt ;
- la prévision infra-journalière du DNI ; l'apprentissage automatique/profond sera mis à profit pour la prévision de séries temporelles (seules les « mesures » du DNI seront ici utilisées ; une régression paramétrique ou non paramétrique sera réalisée).

4. Stratégie de contrôle-commande fondée sur la théorie de la commande prédictive

Dans le cadre du projet de recherche Eurogia 2020 CSPIMP (*Concentrated Solar Power efficiency IMProvement*), financé, pour la France, par le Ministère de l'Industrie, PROMES-CNRS a développé et validé expérimentalement une stratégie de contrôle-commande fondée sur la théorie de la commande prédictive destinée à la centrale solaire à collecteurs cylindro-paraboliques Palma del Rio II (d'une puissance de 50 MW). Cette centrale, exploitée par Acciona Energia et qui est équipée d'un générateur d'appoint (pas de système de stockage thermique), est située à Palma del Rio, en Andalousie (Espagne). La stratégie développée a permis, à partir de prévisions infra-horaires de l'éclairement normal direct, la régulation, en temps réel, du débit du fluide caloporteur. La validation expérimentale (réalisée par Acciona Energia) des algorithmes développés par PROMES-CNRS a montré, d'une part, que la stratégie MPC proposée par le laboratoire, par sa capacité à réguler efficacement le débit du fluide caloporteur (ce dernier est généralement surestimé), améliore les performances (la productivité) de la centrale et, d'autre part, que les risques de surchauffe (provoquée par un débit trop faible) sont minimisés.

Dans un premier temps, le/la doctorant(e) recruté(e) s'appropriera les algorithmes développés par PROMES-CNRS au cours du projet de recherche Eurogia 2020 CSPIMP pour le contrôle-commande de la centrale solaire Palma del Rio II. L'objectif principal des travaux est le développement d'algorithmes, « élargissant » le périmètre de la stratégie développée par PROMES-CNRS : réguler, en temps réel, le débit du fluide caloporteur et gérer le système de stockage – la microcentrale solaire MicroSol-R est équipée d'un système de stockage de type thermocline – en anticipant l'impact des perturbations atmosphériques sur la disponibilité de la ressource solaire. La stratégie, sur la base de prévisions infra-horaires et infra-journalières du DNI, cherchera à optimiser le stockage et le déstockage de l'énergie

thermique, tout en minimisant, autant que possible, le recours à un générateur d'appoint (selon la nature des perturbations atmosphériques, il sera parfois nécessaire de recourir à ce générateur), afin de stabiliser la production d'électricité (au sein de la microcentrale solaire MicroSol-R, par la mise en œuvre d'un cycle de Rankine organique). Afin d'évaluer, dans un premier temps en simulation, puis expérimentalement l'apport de la stratégie fondée sur la théorie de la commande prédictive proposée par PROMES-CNRS, une stratégie de contrôle « standard » (non prédictive) sera aussi développée. Elle jouera le rôle de stratégie de référence.

5. Evaluation de la robustesse du contrôleur MPC et étude de l'effet d'échelle

La robustesse du contrôleur MPC développé, d'une part aux perturbations, d'autre part aux erreurs de modélisation et de prévision, sera évaluée. Si nécessaire – les propriétés, en particulier de stabilité, et les performances du contrôleur sont dégradées de façon significative par les erreurs de modélisation et de prévision –, ce dernier sera robustifié. Le/la doctorant(e) recruté(e) recherchera dans la littérature scientifique la technique de robustification du contrôleur la plus adaptée ; il conviendra toutefois de ne pas augmenter le coût calculatoire du problème d'optimisation à résoudre. Enfin, l'effet d'échelle (de la microcentrale à la centrale) sur le modèle développé et le contrôleur MPC sera étudié.

6. Synthèse et plan de travail

En résumé, les tâches qui seront confiées au/à la doctorant(e) recruté(e) sont :

- le développement d'un modèle dynamique de la microcentrale solaire MicroSol-R [t_0 à $t_0 + 6$ mois] ;
- le développement d'algorithmes pour la prévision multi-horizon (infra-horaire/infra-journalière) de l'éclairement normal direct [t_0 à $t_0 + 12$ mois] ;
- le développement d'un contrôleur MPC pour la gestion prédictive des centrales solaires à collecteurs cylindro-paraboliques équipées de systèmes de stockage thermique [$t_0 + 12$ mois à $t_0 + 24$ mois] ;
- l'évaluation de la robustesse du contrôleur MPC aux perturbations et aux erreurs de modélisation et de prévision et l'étude de l'effet d'échelle [$t_0 + 18$ mois à $t_0 + 24$ mois] ;
- la validation expérimentale, grâce à MicroSol-R, des développements réalisés [$t_0 + 24$ mois à $t_0 + 36$ mois].

7. Compétences recherchées

- Modélisation et identification des systèmes
- Intelligence artificielle (apprentissage automatique/profond)
- Automatique avancée (théorie de la commande prédictive)

8. Conditions

- Lieu d'exercice : PROMES-CNRS, rambla de la thermodynamique, 66100 Perpignan ; PROMES-CNRS, avenue Professeur Félix Trombe, 66120 Font-Romeu-Odeillo-Via.
- Salaire : ~1700 € net/mensuel.
- Début des travaux : septembre 2022.