

\*\*\*English version below\*\*\*

## Offre de thèse : Optimisation 4E (Energie, Exergie, Économie et Environnement) d'un cycle de Brayton supercritique au CO<sub>2</sub> pour la décarbonation de la chaleur industrielle

### Contexte.

Les cycles Brayton supercritiques au CO<sub>2</sub> (sCO<sub>2</sub>) sont une solution prometteuse pour atteindre les objectifs de décarbonation de la chaleur industrielle notamment grâce aux possibilités de valorisation de chaleur fatale et d'interactions avec le réseau électrique qu'ils permettent (figure 1).

Le projet [REVCO2](#) (PEPR SPLEEN) qui réunit quatre laboratoires de recherche (CETHIL, Lafset, LMFA et le LUSAC) a donc pour objectif de développer cette technologie en couvrant les enjeux liés à la fois aux machines tournantes, aux échangeurs thermiques mais aussi à l'intégration technico-environnementale de ce système.

### Enjeux et verrous.

Au-delà des aspects turbomachines et échangeurs traités dans d'autres tâches du projet REVCO2, différents verrous scientifiques sont identifiés à l'échelle du système :

1. *Identification de la configuration optimale.* Par exemple, Bellos [1] observe que les cycles complexes (échangeur interne, réchauffage intermédiaire) peuvent améliorer les performances, mais que certaines solutions deviennent peu attractives si le gain marginal ne compense pas la hausse de complexité et potentiellement de coût. De plus, ces améliorations de cycles se doivent être d'intérêt en fonctionnement en cycle moteur comme en cycle inverse.
2. *Intégration au procédé industriel et modélisation.* La présence de variations de température élevées dans les échangeurs des cycles de Brayton ainsi que les brusques changements de propriété en cas de fonctionnement proche du point critique rend l'intégration optimale de ces systèmes complexe [2]. Toujours dans une optique d'optimisation de l'intégration, il convient de prendre en compte de façon pertinente les transitoires que ce soit pour des séquences de marche/arrêt avec montée en puissance, d'inversion de cycle ou encore de fonctionnement en charge partielle [3,4]. Les approches de type ML (Machine Learning) sont identifiées comme prometteuses pour répondre à ce défi [3].
3. *Analyse multi-critère.* La compétitivité effective de ces systèmes est encore une question ouverte, notamment pour départager les architectures complexes [1]. De plus, le contexte énergétique et réglementaire pèse lourdement et est aujourd'hui insuffisamment pris en compte, notamment via les incertitudes qui lui sont associées [2]. Enfin, la plupart des travaux proposés se focalisent sur les émissions directes et indirectes de CO<sub>2</sub>, par exemple à travers du calcul du TEWI [5,6], et aboutissent donc à un éclairage limité par rapport à une ACV complète.

### Objectifs de la thèse et déroulé envisagé

La thèse proposée portera sur le développement de méthodes et outils permettant l'optimisation 4E d'un système Brayton fonctionnant au CO<sub>2</sub> supercritique pouvant fonctionner en cycle moteur ou en cycle inverse (pompe à chaleur). A cet effet, les étapes scientifiques suivantes ont été identifiées :

- A. *Développement d'un modèle énergie/exergie dynamique de la machine de Brayton.* Le modèle sera construit à partir de bibliothèques existantes dans la littérature (par exemple la bibliothèque [SCOPE](#)) en visant in fine

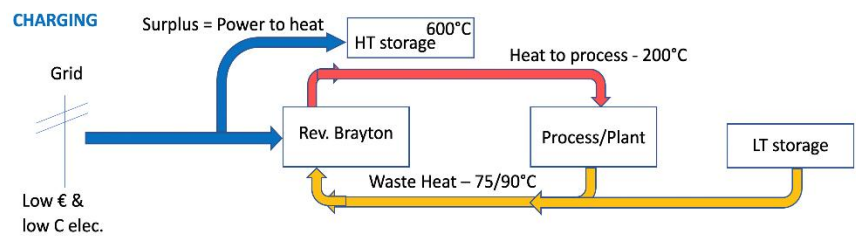


Figure 1a : Mode opératoire 1 - Brayton sCO<sub>2</sub> en mode pompe à chaleur

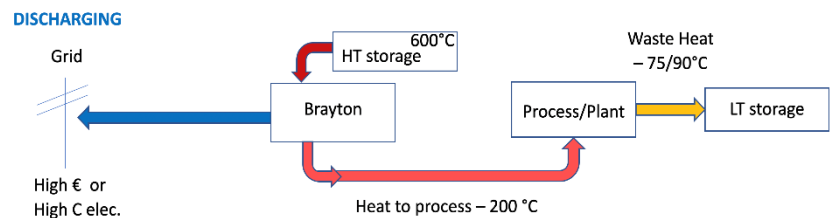


Figure 1b : Mode opératoire 2 - Brayton sCO<sub>2</sub> en mode co-génération

un développement sur Dymola (ou éventuellement OpenModelica). Le modèle sera validé à partir de résultats disponibles dans la littérature (points expérimentaux ou simulations issues de modèles validés) mais aussi à partir des résultats générés dans les autres tâches du projet REVC02.

- B. *Approches data (IA) pour l'optimisation.* Deux volets sont envisagés. Le premier vise à réduire la taille des séries temporelles (prix énergie, contenu environnemental de l'énergie, demande en chaleur) utilisées comme variables d'entrée pour les problèmes d'optimisation. L'objectif serait notamment d'aller au-delà des approches bien établies de clustering de type k-means pour une meilleure prise en compte des dynamiques figurant dans ces séries temporelles et qui peuvent influencer fortement les performances effectivement atteintes. Ces travaux pourront s'appuyer sur des méthodes d'apprentissage non supervisé et auto-supervisé avancées, telles que les autoencodeurs variationnels ou les modèles séquentiels profonds, afin d'extraire des représentations latentes compactes préservant les structures temporelles et les événements rares, souvent déterminants pour l'évaluation des performances des systèmes énergétiques. L'autre volet vise à développer des modèles de substitution (surrogate modelling) permettant de prédire le comportement dynamique des composants principaux (notamment les turbomachines et les échangeurs) afin de permettre leur prise en compte dans des algorithmes d'optimisation du pilotage. Une attention particulière sera portée à la robustesse et à la généralisabilité des modèles développés, notamment via l'intégration de contraintes physiques (approches *physics-informed*) et de techniques d'apprentissage probabiliste permettant de quantifier les incertitudes, afin de garantir la fiabilité des prédictions dans des régimes de fonctionnement peu ou pas observés.
- C. *Optimisation du contrôle et évaluation technico-environnementale.* La première étape consistera à développer un outil d'optimisation, par exemple à partir d'un environnement Python, faisant appel au solveur Gurobi au besoin, et incluant une FMU représentative de la machine de Brayton réversible générée à partir du modèle Dymola développé auparavant. Une étude de sensibilité sera ensuite menée pour évaluer différentes stratégies de contrôle incluant notamment des critères environnementaux (contenu ACV dynamique du réseau électrique, d'autres générateurs de chaleur, etc.) pour la prise de décision.

De plus, tout au long de la thèse, la personne recrutée aura à assurer **la communication et la diffusion** des résultats. Cela passe notamment par :

- Rédaction d'articles pour des journaux scientifiques
- Participation à des conférences internationales dans le domaine.
- Rédaction de rapports techniques à destination des organismes financeurs
- Participation aux réunions de travail du projet REVC02 et interaction avec les autres partenaires et éventuellement de tierces parties (par exemple les industriels faisant partie du comité scientifique du projet)

### Profil recherché

- Titulaire d'un diplôme d'ingénieur ou de master dans une spécialité incluant des connaissances approfondies en thermodynamique, machines thermiques, échangeurs de chaleur et simulation de systèmes énergétiques,
- Des connaissances en méthode pincement, optimisation énergétique et/ou en IA appliquée aux systèmes énergétiques sont un plus,
- Goût pour une thèse en sciences appliquées dans un environnement collaboratif en mode projet, avec objectif de diffusion vers le monde industriel
- Anglais niveau C1

Localisation INSA Lyon, Villeurbanne (69),

Financement sur projet PEPR SPLEEN, à partir d'octobre 2026

Candidature Envoi **CV uniquement** à Marc CLAUSSE, [marc.clausse@insa-lyon.fr](mailto:marc.clausse@insa-lyon.fr) et François ROUSSET, [francois.rousset@insa-lyon.fr](mailto:francois.rousset@insa-lyon.fr)

## PhD position: 4E optimisation (Energy, Exergy, Economy and Environment) of a Brayton cycle using supercritical CO<sub>2</sub> for the decarbonisation of industrial heat

### Context.

Brayton cycles using supercritical CO<sub>2</sub> (sCO<sub>2</sub>) are a promising solution for achieving the objectives of industrial heat decarbonisation, notably through the opportunities they provide for waste-heat recovery and interaction with the electricity grid that they enable (Figure 1).

The project [REVCO2](#) (PEPR SPLEEN), which brings together four research laboratories (CETHIL, Lafset, LMFA and LUSAC), therefore aims to develop this technology by addressing challenges related not only to turbomachinery and heat exchangers, but also to the techno-environmental integration of this system.

### Challenges and bottlenecks.

Beyond the turbomachinery and heat-exchanger aspects addressed in other tasks of the REVCO2 project, several scientific bottlenecks are identified at system level:

1. *Identification of the optimal configuration.* For example, Bellos [1] observes that complex cycles (internal heat exchanger, intermediate reheating) can improve performance, but that some options become unattractive if the marginal gain does not offset the increase in complexity and, potentially, in cost. Moreover, these cycle improvements must be relevant for both power-cycle and reverse-cycle operation.
2. *Integration into the industrial process and modelling.* The presence of large temperature variations in the heat exchangers of Brayton cycles, together with abrupt property changes when operating close to the critical point, makes the optimal integration of these systems complex [2]. Still with a view to optimising integration, transients should be properly accounted for, whether for start-up/shutdown sequences with ramp-up, cycle reversal, or part-load operation [3,4]. ML (Machine Learning) approaches are identified as promising to address this challenge [3].
3. *Multi-criteria analysis.* The actual competitiveness of these systems remains an open question, particularly when discriminating between complex architectures [1]. In addition, the energy and regulatory context has a major impact and is currently insufficiently taken into account, notably through the associated uncertainties [2]. Finally, most proposed studies focus on direct and indirect CO<sub>2</sub> emissions, for example through TEWI calculation [5,6], and therefore provide a limited perspective compared with a full LCA.

### Objectives of the PhD thesis and envisaged work plan

The proposed PhD thesis will focus on the development of methods and tools enabling the 4E optimisation of a Brayton system operating with supercritical CO<sub>2</sub> and capable of operating as a power cycle or a reverse cycle (heat pump). To this end, the following scientific steps have been identified:

- A. *Development of a dynamic energy/exergy model of the Brayton machine.* The model will be built from existing libraries in the literature (for example the [SCOPE](#) library), ultimately targeting development in Dymola (or possibly OpenModelica). The model will be validated against results available in the literature (experimental points or simulations from validated models), as well as against results generated in the other tasks of the REVCO2 project.
- B. *Data (AI) approaches for optimisation.* Two strands are envisaged. The first aims to reduce the size of the time series (energy prices, environmental content of energy, heat demand) used as input variables for optimisation

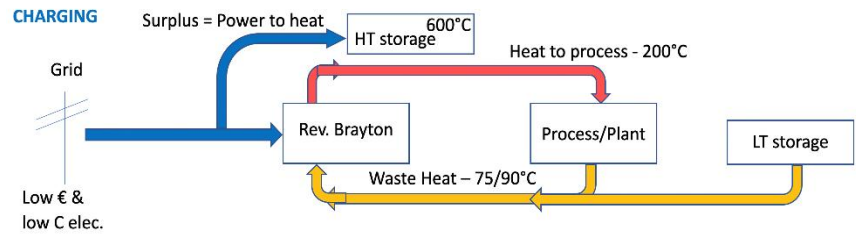


Figure 1a : Operating mode 1 - Brayton sCO<sub>2</sub> in heat-pump mode

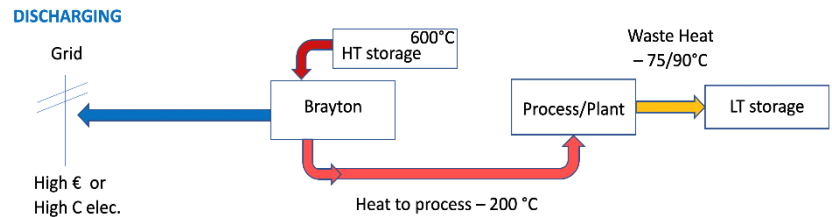


Figure 1b : Operating mode 2 - Brayton sCO<sub>2</sub> in cogeneration mode

problems. In particular, the objective would be to go beyond well-established k-means clustering approaches in order to better account for the dynamics present in these time series, which can strongly influence the performance actually achieved. This work may rely on advanced unsupervised and self-supervised learning methods, such as variational autoencoders or deep sequential models, in order to extract compact latent representations that preserve temporal structures and rare events, which are often decisive for evaluating the performance of energy systems. The other strand aims to develop substitution models (surrogate modelling) capable of predicting the dynamic behaviour of the main components (notably turbomachinery and heat exchangers), so that they can be taken into account in control-optimisation algorithms. Particular attention will be paid to the robustness and generalisability of the models developed, notably through the integration of physical constraints (*physics-informed* approaches) and probabilistic learning techniques used to quantify uncertainties, in order to ensure the reliability of predictions in operating regimes that have been little observed or not observed at all.

- C. *Control optimisation and techno-environmental assessment.* The first step will consist in developing an optimisation tool, for example from a Python environment, using the Gurobi solver if necessary, and including an FMU representative of the reversible Brayton machine generated from the Dymola model developed beforehand. A sensitivity study will then be carried out to assess different control strategies, including environmental criteria (dynamic LCA content of the electricity grid, other heat generators, etc.) for decision-making.

In addition, throughout the PhD thesis, the recruited person will be responsible for **communicating and disseminating** the results. This includes, in particular:

- Writing articles for scientific journals
- Participation in international conferences in the field.
- Writing technical reports for the funding bodies
- Participation in REVC02 project working meetings and interaction with the other partners and, where relevant, third parties (for example the industrial stakeholders sitting on the project scientific committee)

#### Candidate profile

- Holder of an engineering degree or Master's degree in a field including in-depth knowledge of thermodynamics, thermal machines, heat exchangers and energy-system simulation,
- Knowledge of pinch analysis, energy optimisation and/or AI applied to energy systems would be an advantage,
- Interest in undertaking a PhD in applied sciences within a collaborative, project-based environment, with the objective of dissemination towards industry
- English level C1, a good knowledge of French would be an advantage.

Location INSA Lyon, Villeurbanne (69),

Funding PEPR SPLEEN project, from October 2026

Application Send **CV only** to Marc CLAUSE, [marc.clausse@insa-lyon.fr](mailto:marc.clausse@insa-lyon.fr) and François ROUSSET, [francois.rousset@insa-lyon.fr](mailto:francois.rousset@insa-lyon.fr)

## Bibliographie

- [1] Bellos E. A comparative thermodynamic analysis of different supercritical CO<sub>2</sub> reverse Brayton high temperature heat pumps. *Energy Convers Manag* 2026;356:121360. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2026.121360>.
- [2] Kong L, Kloeppel S, Schlosser F, Kabat N, Carson JK, Walmsley TG. Advances in high-temperature heat pump technologies for industrial process applications with large temperature glides: Assessing the potential for carbon dioxide as a refrigerant. *Energy Convers Manag* 2026;350:120933. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120933>.
- [3] Wang X, Wang R, Bian X, Cai J, Tian H, Shu G, et al. Review of dynamic performance and control strategy of supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle. *Energy AI* 2021;5:100078. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100078>.
- [4] Bian X, Wang X, Wang R, Cai J, Tian H, Shu G, et al. A comprehensive evaluation of the effect of different control valves on the dynamic performance of a recompression supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle. *Energy* 2022;248:123630. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123630>.
- [5] Dai B, Liu C, Liu S, Wang D, Wang Q, Zou T, et al. Life cycle techno-enviro-economic assessment of dual-temperature evaporation transcritical CO<sub>2</sub> high-temperature heat pump systems for industrial waste heat recovery. *Appl Therm Eng* 2023;219:119570. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119570>.
- [6] Sulaiman AY, Cotter D, Wilson C, Kamkari B, Hewitt N. Energetic and exergo-environmental analysis of transcritical high-temperature heat pumps with low GWP refrigerants for industrial waste heat recovery. *Int J Refrig* 2023;156:12–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.09.021>.