

Summary

Cryogenic CO₂ capture technologies represent a promising alternative for large-scale decarbonization of industrial processes. This Ph.D. thesis is dedicated to the optimization of cryogenic facilities for carbon dioxide capture applied to complete industrial cases such as cement or power production. The main objective is to minimize the specific energy consumption of cryogenic processes while maintaining a high CO₂ recovery and purity. Indeed, despite their ability to produce high-purity CO₂ streams, cryogenic units remain strongly limited by the energy demand related to deep refrigeration. Therefore, the optimization of such systems is crucial to make them energetically and economically viable for industrial deployment.

The work presents a detailed literature review and process analysis highlighting the advantages and limitations of existing cryogenic technologies compared to other capture routes. Then, several process configurations are investigated, including a standalone cryogenic purification unit assisted with membrane, a hybrid VPSA-CPU process, a sub-ambient membrane and a full cryogenic desublimation system. Each configuration is modeled using process simulation tools, and an optimization strategy is developed. Genetic algorithms are employed to identify the optimal operating conditions leading to minimum energy consumption and to evaluate the sensitivity of key design parameters.

The results show that the developed optimization framework allows a significant reduction in energy demand compared to conventional reference designs. For instance, the optimized cryogenic purification unit achieved energy savings of up to 15% while ensuring more than 95% CO₂ recovery and high purity. Similar trends are obtained for the hybrid and desublimation schemes, confirming the robustness of the methodology. The simulations are based on industrial process flue gas demonstrating the applicability of the proposed approach.

Finally, this thesis provides a comprehensive study on micro gas turbine for improving the energy efficiency of cryogenic CO₂ capture systems. The proposed work contributes to the development of advanced and competitive capture technologies capable of reducing the carbon footprint of heavy industrial sectors while maintaining technical feasibility and reliability.

Résumé

Les technologies cryogéniques de capture du CO₂ représentent une alternative prometteuse pour la décarbonation à grande échelle des procédés industriels. Cette thèse de doctorat est consacrée à l'optimisation des procédés cryogéniques de capture du dioxyde de carbone, appliquées à des cas industriels tels que la production de ciment ou d'électricité. L'objectif principal est de minimiser la consommation énergétique des procédés cryogéniques tout en maintenant un taux élevé de récupération et une haute pureté du CO₂. Malgré cette capacité, les unités cryogéniques restent fortement limitées par la demande énergétique liée à la réfrigération. L'optimisation de ces systèmes est donc nécessaire pour les rendre viables sur les plans énergétique et économique pour un déploiement industriel.

Le travail présente une revue de littérature détaillée et une analyse des procédés mettant en évidence les avantages et les limites des technologies cryogéniques existantes par rapport aux autres voies de captage. Ensuite, plusieurs configurations de procédés sont étudiées, notamment une unité de purification cryogénique assistée par membrane, un procédé hybride VPSA-CPU, une membrane froide et un système cryogénique par désublimation. Chaque configuration est modélisée à l'aide d'outils de simulation de procédés, et une stratégie d'optimisation est développée. Des algorithmes génétiques sont utilisés afin d'identifier les conditions opératoires optimales menant à une consommation énergétique minimale et d'évaluer la sensibilité des principaux paramètres des procédés.

Les résultats montrent que le cadre d'optimisation développé permet une réduction significative de la demande énergétique par rapport aux conceptions de référence conventionnelles. Par exemple, l'unité de purification cryogénique optimisée permet des économies énergétiques allant jusqu'à 15 %, tout en assurant plus de 95 % de récupération du CO₂ et une haute pureté. Des tendances similaires sont observées pour les schémas hybrides et de désublimation, confirmant la robustesse de la méthodologie. Les simulations sont basées sur des fumées industrielles démontrant l'applicabilité de l'approche proposée.

Enfin, cette thèse propose une étude approfondie de la capture du CO₂ appliquée à des fumées de micro-turbines à gaz dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique du système complet. Les travaux présentés contribuent au développement de technologies de captage avancées et compétitives, capables de réduire l'empreinte carbone des secteurs industriels lourds tout en maintenant une faisabilité.