

## **Modélisation thermodynamique des systèmes de stockage d'énergie par air comprimé**

Ghady Dib

Dans un monde où la demande énergétique augmente, la question du remplacement d'énergies fossiles par des énergies renouvelables, propres et durables est essentielle. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies renouvelables, le stockage de l'énergie est essentiel afin de répondre à une demande constante. L'utilisation du stockage par air comprimé semble une solution prometteuse dans le domaine du stockage d'énergie : elle se caractérise par une grande fiabilité, un faible impact environnemental et une remarquable densité énergétique stockée (kWh/m<sup>3</sup>). Jusqu'à présent, l'air comprimé a été utilisé dans de nombreux domaines comme vecteur d'énergie pour stocker différentes formes d'énergies (transport routier, poste pneumatique et plongée sous-marine).

L'objectif de cette thèse est de proposer une ligne directrice pour le système de trigénération de stockage d'énergie par air comprimé (CAES) à petite échelle couplé à une application de bâtiment basée sur des analyses thermodynamique, paramétrique et économique. Le système CAES consiste à stocker le surplus de production d'énergie électrique renouvelable sous forme d'air comprimé afin de le restituer durant des pics de consommation électrique. La compression et la détente d'air, avec leur récupération de chaleur et de froid respectivement, présentent actuellement des sujets de recherche afin de trouver le système de stockage de trigénération (électrique, chaud et froid) le plus efficace.

Dans le chapitre 2, un modèle numérique global du système CAES à petite échelle, couplé à un modèle de bâtiment et à des modules d'énergie renouvelable, a été développé dans le but de créer un outil de dimensionnement capable de modéliser différents composants du système (compresseur, détendeur, échangeur, réservoir d'air haute pression) et des structures d'installation. Nous avons proposé dans cette étude plusieurs scénarios énergétiques (autonome et connecté au réseau électrique), localisations géographiques et typologies de bâtiments.

Les compresseurs et détendeurs adiabatiques ont d'abord été sélectionnés pour étudier le système de trigénération de stockage d'énergie par air comprimé adiabatique avancé (AA-CAES). Le mode connecté au réseau électrique a montré l'importance d'utiliser le système AA-CAES couplé au bâtiment et au réseau avec un effacement électrique (couverture électrique verte) de 75,9 % à Nice. En outre, le système de trigénération AA-CAES (électrique, chaud et froid) offre un compromis entre l'efficacité du système électrique, le taux de couverture du chaud et du froid en fonction de l'application du bâtiment et de la taille des modules d'énergie renouvelable.

Les compresseurs et détendeurs isothermes développés par les start-up LightSail Energy et Enairys Powertech ont été modélisés dans le chapitre 3, pour étudier le système de trigénération de stockage d'énergie par air comprimé isotherme (I-CAES). Ces compresseurs/détendeurs sont refroidis/chauffés par injection d'eau froide/chaude (LightSail Energy) et par piston liquide (Enairys Powertech) et par conséquent

la chaleur (ou le froid) absorbée est redonnée à l'air lors de la détente/compression. La technologie LightSail Energy a montré plus d'intérêt par la production d'eau chaude/froide lors de la compression/détente de l'air que la technologie Enairys Powertech qui présente une compression/détente d'air davantage isotherme avec des rejets thermiques trop proches de la température ambiante pour être récupérables.

Le chapitre 4 compare les systèmes AA-CAES et I-CAES d'un point de vue financier en se référant à une analyse du marché des systèmes de production/utilisation de l'air comprimé. Plusieurs prototypes numériques ont été étudiés

en se basant sur des unités commerciales trouvées sur le marché de l'air comprimé (AA-CAES) et sur le prototype LightSail Energy (I-CAES). Notons que le marché de la turbine est actuellement concentré sur les petites plages de pression (10-20 bar) ce qui complique le montage d'un prototype AA-CAES avec une pression de stockage importante (200 bar). À partir de l'analyse économique LCOE (*levelized cost of energy*), il apparaît que le prototype LightSail Energy présente le coût d'énergie livrée le plus bas (€/kWh) pour une période opérationnelle de 20 ans.

**Laboratoire d'accueil :** Cette thèse Cifre a été réalisée entre le Centre d'Énergétique et de Thermique de Lyon et AIA Life Designers. La direction académique était assurée par Rémi Revellin, ex-responsable du thème EHTIS (*Energy and Heat Transfer in Industrial Systems*), qui fait partie des cinq thèmes de recherche au laboratoire CETHIL. Le laboratoire constitue une unité mixte de recherche (UMR 5008) de l'INSA Lyon, du CNRS et de l'Université Claude Bernard Lyon 1. Il est composé d'environ 115 personnes, aborde des problématiques en lien avec la physique des transferts thermiques, la thermique dans les systèmes complexes et leur efficacité énergétique et les procédés gouvernés par les transferts thermiques.

La direction technique était menée par Simon Davies et Quentin Perroit au sein d'AIA Environnement qui constitue le pôle d'expertise environnementale du groupe AIA Life Designers. Cette thèse a été inscrite auprès de l'école doctorale MEGA et financée par l'ANRT et AIA Life Designers dans le cadre d'une convention CIFRE.

Plus d'informations : <https://cethyl.insa-lyon.fr>.



**Soutenance de la thèse :** La thèse a été soutenue le 27 octobre 2020 en présentiel à l'INSA de Lyon et en visioconférence devant un jury composé de : Vincent Lemort, professeur à l'Université de Liège (rapporteur); Lavinia Grosu, maître de conférences HDR à l'Université Paris-Ouest (rapporteuse) et François Lanzetta, professeur à l'Université de Franche-Comté (président). Les travaux menés durant cette thèse ont été dirigés par : Rémi Revellin, professeur à l'INSA de Lyon (directeur); Romuald Rullière, maître de conférences à l'INSA de Lyon (encadrant); Philippe Haberschill, maître de conférences, HDR émérite à l'INSA de Lyon (co-directeur de thèse); Simon Davies, directeur AIA Environnement (encadrant) et Quentin Perroit, ingénieur chef de projet (encadrant).

Le manuscrit est disponible dans son intégralité sur : [www.theses.fr/2020LYSEI092](http://www.theses.fr/2020LYSEI092).

**Et après la thèse ?** Ghady Dib finalise la valorisation de ses travaux de recherche menés durant la thèse avec l'aide du CETHIL (publication de résultats) et en parallèle il propose sa candidature auprès d'entreprises du secteur de l'énergie et sociétés de consultants.