



Etude expérimentale et numérique d'un système de stockage à petite échelle de l'électricité renouvelable par compression d'air

Mylène MARIN GALLEGO, Mohand TAZEROUT

Département Systèmes Energétiques et Environnement, IMT Atlantique, 4 rue Alfred Kastler, BP 20722, 44307 Nantes, Cedex 03, France

mylene.marin-gallego@imt-atlantique.fr, mohand.tazerout@imt-atlantique.fr

Résumé : Une des technologies émergentes pour le stockage de la production excédante d'électricité renouvelable est de la convertir en énergie mécanique via la compression d'air. Les systèmes actuellement implémentés sont rares et à grande échelle. Dans le cadre de cette étude nous nous intéressons à un système de stockage à petite échelle (max 10 kW). Des études théoriques sont proposées dans la littérature et démontrent la faisabilité thermodynamique de ces systèmes. Les études expérimentales restent encore rares étant donné les verrous technologiques à relever. L'objectif de ce papier est de présenter un banc expérimental de stockage de l'électricité par compression d'air actuellement non optimal et de proposer des voies d'amélioration par la modélisation thermodynamique de ce système. Les hypothèses du modèle sont explicitées, et les résultats obtenus sont comparés aux performances actuelles du pilote expérimental.

Mots clés : micro CAES, stockage d'énergie, efficacité énergétique

Introduction

L'irrégularité de la production des énergies renouvelables ainsi que de la consommation qui ne correspond généralement pas aux cycles de production de celles-ci conduisent inexorablement à la mise en place de systèmes de stockage. Stocker de l'énergie est un véritable défi technico-économique car les énergies renouvelables sont, par nature, diffuses, intermittentes et difficilement prévisibles. L'enjeu est donc de stocker cet excédent énergétique en absence de production et de la restituer suivant le besoin.

Le stockage d'énergie par compression d'air (Compressed Air Energy Storage – CAES) est une technologie émergente de stockage. Elle est considérée comme l'une des options les plus prometteuses pour le stockage de l'énergie du fait de son caractère intrinsèquement sûr et facilement maniable, et de sa faisabilité économique [1]. L'énergie électrique renouvelable non consommée est utilisée pour comprimer de l'air. Cette énergie stockée est ensuite réutilisée par détente de l'air dans une turbine afin de produire de l'électricité pendant les pics de consommation. A grande échelle, bien que ce concept ait été introduit depuis plus de 50 ans, seulement deux centrales électriques ont été construites de nos jours [2]. La raison principale est la dépendance géologique (cavernes salines, aquifères, mines abandonnées...) de ce type d'installations. L'avantage des systèmes réduits est de pouvoir remplacer les réservoirs naturels par des réservoirs artificiels et ainsi augmenter l'adaptabilité du système [3]. Les choix technologiques, l'expérimentation et la modélisation des systèmes à petite échelle (appelés micro-CAES) sont des sujets de recherche encore peu explorés.

Voici une liste non exhaustive des technologies présentées dans la littérature : des systèmes de compression d'air couplé à un stockage hydraulique [4], un système de polygénération à petite échelle [5], un système CAES avec une décharge par moteur pneumatique [2]. Une analyse énergétique et exergetique d'un système de stockage hydropneumatique est proposée par Kim et al. [4]. Les auteurs démontrent son efficacité pour différentes configurations, avec un rendement global compris entre 34,0% et 74,4%. Une méthodologie de dimensionnement a été proposée par Janneli et al. [5] pour le stockage de l'électricité issue de panneaux photovoltaïques pour les besoins d'une station météorologique. Il s'agit d'une des rares études proposant une valorisation des frigories issues de la phase de décharge de l'air.

Une étude menée par Liu et al. [3] propose une analyse thermodynamique d'un procédé de stockage faisant intervenir un moteur pneumatique pour la décharge de l'air. L'air comprimé est stocké à faible température ce qui permet de diminuer les pertes thermiques du système et d'augmenter la masse d'air stockée. Le rendement global obtenu est de l'ordre de 20% à 30%.

Ainsi, le principal défi à relever pour cette technologie est la gestion de l'énergie thermique produite pendant les différentes phases du système. Il s'agit d'un obstacle aux hauts rendements, pour lequel des verrous

scientifiques et technologiques restent à lever. Des solutions pour stocker les frigories issues du refroidissement de l'air pendant la détente doivent aussi être proposées.

Enfin, bien qu'un grand nombre d'études concernant la technologie CAES soit observable dans la littérature (voici quelques exemples récents : [6]-[10]), la plupart de ces études sont théoriques. La plupart des études expérimentales sont à grande échelle (comme les sites de Huntorf et McIntosh). Le manque de travaux expérimentaux est lié à la difficulté à trouver un système adapté à la détente pour l'air comprimé. En effet, les turbines commerciales sont dimensionnées pour fonctionner avec du gaz, de la vapeur ou du liquide. Il n'existe pas de turbines spécifiquement construites pour de l'air comprimé. Le système commercial se rapprochant le plus de l'équipement recherché est une turbine à gaz. Cependant il s'agit d'un investissement élevé. Des recherches proposent des systèmes alternatifs nécessitant un investissement plus faible [11].

Un pilote expérimental de stockage de l'énergie électrique par compression d'air à petite échelle (inférieur à 10 kW) a été développé au laboratoire GEPEA. La première partie de cette étude est dédiée à sa description. L'objectif de cette étude est d'améliorer ce pilote non optimal dont les performances sont aujourd'hui faibles. La seconde partie de cette étude est donc dédiée à la modélisation de ce système. L'influence des différents paramètres opératoires a pu ainsi être quantifiée et des voies d'amélioration du pilote sont proposées en perspectives.

1. Matériel et méthodes

1.1. Présentation du banc expérimental de stockage d'énergie par compression d'air

La Figure 1 explicite le principe du banc expérimental de stockage d'énergie électrique par compression d'air. La phase de charge consiste en une conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique par la compression de l'air. Il est constitué d'un moteur qui est relié à trois étages de compression (CP1, CP2, CP3) refroidis par trois ventilateurs (E1, E2, E3), et le réservoir. Le débit massique de l'air entrant (FT01) et la puissance électrique entrante (WT01) sont mesurés. Pour chaque étage de compression, la température de l'air avant (TE01, TE03, TE05) et après (TE02, TE04, TE06) refroidissement de l'air sont mesurés, ainsi que la pression après chaque étage de compression (PT1, PT2, PT3).

La phase de décharge, quant à elle, consiste en une conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique par la détente de l'air. L'originalité de ce pilote expérimental repose sur le déroulement de la décharge. L'air comprimé n'est pas introduit dans une turbine pour produire de l'électricité, comme dans les systèmes classiques. Ici, une solution astucieuse et plus économique a été choisie : l'air est détendu par une vanne de détente puis il est introduit dans un moteur à air comprimé qui est couplé à un alternateur. La température et la pression de l'air sont mesurées avant (TE07, PT4) et après (TE08, PT5) la détente, ainsi qu'en sortie du moteur à air comprimé (TE09, PT6). De plus, le débit d'air (FT02) et la puissance délivrée par le moteur (WT02) sont mesurés.

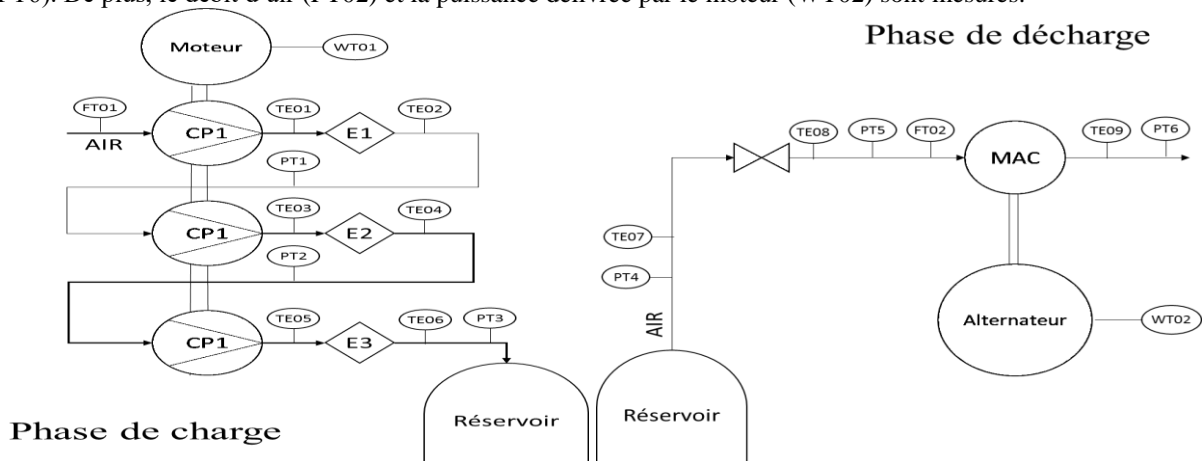


Figure 1 : Schémas des phases de charge et de décharge de l'énergie électrique du pilote CAES.

Ainsi, le pilote de stockage comprend trois étages de compression refroidis et un étage de détente assuré par un détendeur couplé à un moteur à air comprimé. Le temps de stockage et de déstockage sont obtenus par le suivi dynamique des mesures du pilote. Lorsque le réservoir est plein ($PT3 = P_{max}$), le temps de stockage est atteint. Au contraire, lorsque le réservoir est vide ($PT4 = P_{atm}$), le temps de déstockage est atteint.

La Figure 2 est une vue d'ensemble de l'installation avec à gauche le système de compression d'air, au centre le moteur à air comprimé et à droite les bouteilles de stockage de l'air.



Figure 2 : Photographie du banc expérimental de stockage de l'énergie électrique par compression d'air.

1.2. Modélisation du système de stockage d'énergie par compression d'air

La modélisation du système a été réalisée sous Matlab/Simulink. La Figure 3 présente la structure du programme utilisé.

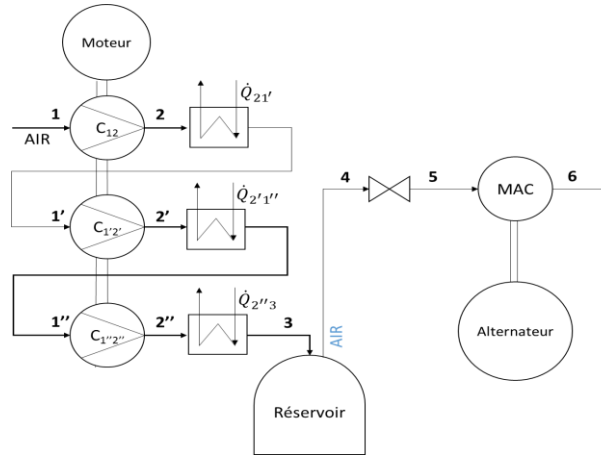


Figure 3 : Modèle basique du système de stockage de l'électricité par compression d'air.

Les notations utilisées dans les parties suivantes sont conformes aux transformations explicitées par la Figure 3 et à la nomenclature présentée en fin de document.

1.1.1. Ecriture du modèle

Les hypothèses du modèle sont les suivantes :

- Le procédé est considéré en régime statique.
- L'air est supposé sec et il se comporte comme un gaz parfait.
- Les rendements mécaniques et électriques des compresseurs et du moteur à air comprimé sont égaux à 1.
- La compression et la détente sont des phénomènes polytropiques.
- Le détendeur conduit à un laminage isenthalpique.

La variation d'enthalpie de chaque étape de compression en tenant compte du caractère polytropique des transformations est calculée comme suit :

$$\Delta h_{12} = \frac{1}{\eta_{comp}} \frac{n_c}{n_c - 1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n_c - 1}{n_c}} - 1 \right] \quad (1)$$

$$\Delta h_{1'2'} = \frac{1}{\eta_{comp}} \frac{n_c}{n_c - 1} RT_1 \left[\left(\frac{P_{2'}}{P_{1'}} \right)^{\frac{n_c - 1}{n_c}} - 1 \right] \quad (2)$$

$$\Delta h_{1''2''} = \frac{1}{\eta_{comp}} \frac{n_c}{n_c - 1} RT_1 \left[\left(\frac{P_{2''}}{P_{1''}} \right)^{\frac{n_c - 1}{n_c}} - 1 \right] \quad (3)$$

La puissance de chaque étage de compression résulte du produit de la variation d'enthalpie et du débit massique d'air entraîné (voir équations (4), (5) et (6)) et la puissance totale consommée par le compresseur est la somme de ces contributions (équation (7)) :

$$P_{12} = \dot{m}_{air}^C \Delta h_{12} \quad (4)$$

$$P_{1'2'} = \dot{m}_{air}^C \Delta h_{1'2'} \quad (5)$$

$$P_{1''2''} = \dot{m}_{air}^C \Delta h_{1''2''} \quad (6)$$

$$P_{charge} = P_{12} + P_{1'2'} + P_{1''2''} \quad (7)$$

La température de l'air après chaque étage de compression est calculée à partir de la loi polytropique $PV^{n_c} = cte$ et la loi des gaz parfaits (voir équations (8) à (10)). Le rendement isentropique du compresseur est défini par la relation (11) :

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n_c-1}{n_c}} \quad (8)$$

$$T_{2'} = T_{1'} \left(\frac{P_{2'}}{P_{1'}} \right)^{\frac{n_c-1}{n_c}} \quad (9)$$

$$T_{2''} = T_{1''} \left(\frac{P_{2''}}{P_{1''}} \right)^{\frac{n_c-1}{n_c}} \quad (10)$$

Le détendeur (transformation 4 – 5 de la Figure 3) quant à lui correspond à un laminage isenthalpique : $\Delta h_{45} = 0$. Puisque l'air est supposé se comporter comme un gaz parfait, cela signifie que l'on suppose la détente 4-5 isotherme : $T_4 = T_5$. L'enthalpie de la transformation 5 – 6 de la Figure 3 est calculée comme suit :

$$\Delta h_{56} = \eta_{dét} \frac{n_D}{n_D-1} RT_5 \left[\left(\frac{P_6}{P_5} \right)^{\frac{n_D-1}{n_D}} - 1 \right] \quad (11)$$

La température en sortie du moteur à air comprimé est définie par l'équation (12) et rendement isentropique par l'équation (14) :

$$T_6 = T_5 \left(\frac{P_5}{P_6} \right)^{\frac{n_D-1}{n_D}} \quad (12)$$

La puissance électrique récupérée pendant la décharge de l'air comprimée est donc égale à :

$$P_{décharge} = P_{56} = \dot{m}_{air}^D \Delta h_{56} \quad (13)$$

La température obtenue en sortie du compresseur nous permet par la suite d'estimer l'enthalpie de l'échange thermique réalisé dans les échangeurs des étapes de compression :

$$Q_{21'} = P_{21'} = \dot{m}_{air}^C C_{p,air} (T_2 - T_{1'}) \quad (14)$$

$$Q_{2'1''} = P_{2'1''} = \dot{m}_{air}^C C_{p,air} (T_{2'} - T_{1''}) \quad (15)$$

$$Q_{2''3} = P_{2''3} = \dot{m}_{air}^C C_{p,air} (T_{2''} - T_3) \quad (16)$$

Le rendement électrique de l'installation est calculé comme l'énergie produite par l'étage de détente lors du temps de décharge par rapport à l'énergie nécessaire pour faire fonctionner les compresseurs pendant le temps de charge :

$$\eta_{elec} = \frac{E_{décharge}}{E_{charge}} = \frac{P_{décharge} \cdot t_{décharge}}{P_{charge} \cdot t_{charge}} \quad (17)$$

Les temps de charge et de décharge sont connus expérimentalement. Ils peuvent aussi être calculés à partir des dimensions du réservoir :

$$t_{charge} = \frac{m_{air}^{stocké}}{\dot{m}_{air}^C} = \frac{P_3 M_{air} V_{réservoir}}{RT_{amb} \dot{m}_{air}^C} \quad (18)$$

$$t_{décharge} = \frac{m_{air}^{déstocké}}{\dot{m}_{air}^D} = \frac{P_4 M_{air} V_{réservoir}}{RT_{amb} \dot{m}_{air}^D} \quad (19)$$

2. Résultats et discussions

La partie suivante présente les performances actuelles du pilote de stockage de l'énergie électrique par compression d'air. Le modèle simplifié développé ci-dessus est confronté à ces résultats puis utilisé pour proposer des voies d'amélioration de ce pilote.

2.1. Résultats du banc expérimental

La première étape de l'expérimentation consiste à convertir l'énergie électrique en énergie mécanique par compression de l'air. Il s'agit de la phase de charge. Elle est terminée lorsque les bouteilles de stockage sont pleines. Le Tableau 1 résume les performances moyennes du pilote pendant la phase de charge.

Tableau 1 : Performances du pilote pendant la phase de charge.

Propriété physique	Valeur
Débit d'air	$\dot{m}_{air}^C = 14,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$
Températures moyennes de l'air après chaque étage de compression refroidi	$T_2 = 112^\circ\text{C}$ et $T_{1'} = 57^\circ\text{C}$ $T_{2'} = 193^\circ\text{C}$ et $T_{1''} = 50^\circ\text{C}$ $T_{2''} = 150^\circ\text{C}$ et $T_3 = 38^\circ\text{C}$
Pressions moyennes de l'air après chaque étage de compression refroidi	$P_2 = 8 \text{ atm}$ $P_{2'} = 45 \text{ atm}$ $P_{2''} = 205 \text{ atm}$

Pression finale dans le réservoir	$P_{réservoir} = 300 \text{ atm}$
Puissance moyenne de compression	$P_{charge} = 3,31 \text{ kW}$
Temps de charge	$t_{charge} = 7 \text{ h } 19 \text{ min}$
Energie de charge	$E_{charge} = 24,2 \text{ kWh}$

Les résultats obtenus montrent un temps de charge assez long. Il peut être diminué en réduisant le volume de stockage. Les étages de compression sont refroidis par des ventilateurs à air. Nous pouvons remarquer que bien qu'il s'agit d'un système très simple il permet un bon refroidissement des étages de compression. Le désavantage majeur de cette installation est l'impossibilité de récupérer la chaleur dégagée lors de la compression de l'air.

Enfin, les coefficients polytropiques des compresseurs ont pu être calculés à partir des résultats expérimentaux ci-dessus : $n_{C_1} = 1,17$; $n_{C_2} = 1,21$; $n_{C_3} = 1,19$.

La seconde phase de l'expérimentation consiste à reconverter l'énergie mécanique emmagasinée sous forme d'air comprimé en énergie électrique. Il s'agit de la phase de décharge. Pour cela l'air est détendu par un détendeur avant d'être introduit dans le moteur à air comprimé, couplé à un alternateur. Le Tableau 2 recense les performances moyennes de l'installation pendant la phase de décharge de l'air comprimé :

Tableau 2 : Performances du pilote pendant la phase de décharge.

Propriété physique	Valeur
Débit d'air	$\dot{m}_{air}^D = 64,7 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$
Pression moyenne de l'air après le détendeur	$P_5 = 5,8 \text{ atm}$
Températures moyennes de l'air avant et après le MAC	$T_4 = -10^\circ\text{C}$ et $T_5 = -45^\circ\text{C}$
Pression moyenne de l'air après le MAC	$P_6 = 1,29 \text{ atm}$
Puissance moyenne délivrée par le MAC	$P_{décharge} = 0,65 \text{ kW}$
Puissance maximale délivrée par le MAC	$P_{décharge,max} = 0,90 \text{ kW}$
Temps de décharge	$t_{décharge} = 1 \text{ h } 05 \text{ min}$
Energie de décharge	$E_{décharge} = 0,70 \text{ kWh}$

Comme pour la compression, le coefficient polytropique de la détente a été calculé : $n_D = 1,097$. Le rendement électrique moyen de l'installation est $\eta_{elec} = 2,9\%$. Si le moteur à air comprimé fonctionnait au maximum de son potentiel, le rendement maximal sera de 4,0% ; ce qui démontre que le moteur à air comprimé est déjà utilisé dans des conditions proches de son optimum. Plusieurs pistes d'améliorations sont envisageables : l'air stocké est détendu par laminage de la pression du réservoir (300 atm) à la pression d'utilisation du MAC (5,8 atm). Toute l'énergie liée à cette détente est perdue par le système. Il est donc primordial de trouver une technologie capable de convertir cette énergie mécanique disponible. De plus, le débit d'air utilisé pour la phase de décharge n'est pas contrôlé, il serait intéressant de vérifier son impact sur le rendement électrique. Un deuxième point d'amélioration est la thermique de ce pilote. L'air circulant dans le système de décharge est extrêmement froid (-10°C à -43°C). Réchauffer l'air en entrée du MAC pourrait augmenter la puissance électrique délivrée. De plus, le rendement global du système pourrait être amélioré par récupération des frigories. Le modèle permettra de quantifier les gains potentiels avant d'apporter les modifications au pilote.

2.2. Validation du modèle

La validation du modèle a été réalisée en se plaçant dans les conditions d'utilisation du pilote. Les données utilisées en entrée du modèle sont répertoriées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Paramètres d'entrée du modèle.

Propriété physique	Valeur
Débit d'air en entrée de compression	$\dot{m}_{air}^C = 14,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$
Températures de l'air à l'entrée de chaque étage de compression refroidi	$T_{1'} = 57^\circ\text{C}$
	$T_{1''} = 50^\circ\text{C}$
Pressions de l'air après chaque étage de compression refroidi	$P_2 = 8 \text{ atm}$
	$P_{2'} = 45 \text{ atm}$
	$P_{2''} = 205 \text{ atm}$
Temps de charge	$t_{charge} = 7 \text{ h } 19 \text{ min}$
Débit d'air en entrée de détente	$\dot{m}_{air}^D = 64,7 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$
Température de l'air en entrée du MAC	$T_4 = -10^\circ\text{C}$
Pression de l'air en entrée du MAC	$P_5 = 5,8 \text{ atm}$
Pression de l'air en sortie du MAC	$P_6 = 1,29 \text{ atm}$
Temps de décharge	$t_{décharge} = 1 \text{ h } 05 \text{ min}$

Le Tableau 4 recense tous les résultats obtenus avec le modèle et les erreurs calculées par rapport aux résultats expérimentaux comme suit : $e_x = \frac{|x_{exp} - x_{calc}|}{(x_{exp} + x_{calc})/2}$.

Tableau 4 : Résultats du modèle.

Propriété physique	Valeur	Erreur relative par rapport aux résultats expérimentaux
Températures de l'air en sortie des étages de compression	$T_2 = 113,1^{\circ}C$ $T_{2'} = 172,4^{\circ}C$ $T_{2''} = 138,6^{\circ}C$	$e_{T_2} = 1,0\%$ $e_{T_{2'}} = 11,3\%$ $e_{T_{2''}} = 7,9\%$
Puissance de compression	$P_{charge} = 3,20kW$	$e_{P_{charge}} = 3,5\%$
Température de l'air en sortie du MAC	$T_6 = -43^{\circ}C$	$e_{T_6} = 4,5\%$
Puissance délivrée par le MAC	$P_{décharge} = 0,61 kW$	$e_{P_{décharge}} = 6,0\%$

Le rendement électrique calculé à partir des résultats présentés dans le Tableau 4 est $\eta_{elec} = 4,2\%$. Les erreurs relatives calculées sont inférieures à 15%, nous considérons que le modèle est représentatif du pilote de stockage de l'énergie électrique et que nous pouvons l'utiliser pour explorer différentes voies d'amélioration du rendement électrique.

2.3. Etude de sensibilité du modèle

Le système de stockage actuellement en place est compact et ses performances sont considérées satisfaisantes. De ce fait, l'étude paramétrique pour l'amélioration du système est concentrée sur le système de déstockage. Les deux paramètres sélectionnés sont la température en entrée de détente et l'ajout d'un étage de détente. En effet, il a été montré précédemment que le moteur à air comprimé actuellement en place fonctionne quasiment au maximum de ses performances, ce qui signifie qu'il n'est pas suffisant pour reconvertir toute l'énergie mécanique stockée sous forme d'énergie électrique.

La figure suivante présente le rendement électrique en fonction de la température en entrée du MAC. La température maximale choisie pour réchauffer l'air est la température maximale atteinte par l'air pendant la compression. Le rendement électrique peut être amélioré de 75% grâce à ce paramètre.

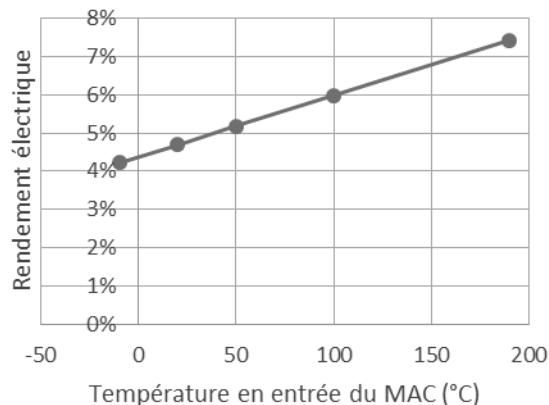


Figure 4 : Rendement électrique en fonction de la température en entrée du MAC pour un étage de détente.

La deuxième solution proposée est l'ajout d'un étage de détente. En supposant une micro turbine capable de détendre l'air de 20 atm à 6 atm avant le MAC, le rendement électrique atteint est de 19,4%. Ceci permet de multiplier par 4 le rendement actuel. Une étude est en cours pour rechercher les microturbines adaptables à notre système. Une modélisation détaillée des modèles possibles sera effectuée avant l'installation sur le banc expérimental.

Conclusions et perspectives

Un pilote de stockage de l'énergie électrique par compression d'air à petite échelle a été développé et caractérisé. L'idée principale de ce pilote est de pouvoir l'installer dans des sites isolés à moindre frais. La phase de charge est assurée par trois étages de compression refroidis et la phase de décharge consiste en une première étape de laminage puis l'utilisation d'un moteur à air comprimé. Le rendement électrique actuel est très bas : de l'ordre de 3%.

Bien conscients des limitations actuelles du banc expérimental de stockage de l'électricité par compression d'air, une étude rigoureuse a été menée afin de proposer des voies d'amélioration de ce dernier. Pour cela, un modèle basé sur la thermodynamique a été construit et validé à partir des données expérimentales du pilote.

L'étude paramétrique du système a été effectuée à l'aide du modèle thermodynamique qui a été développé et validé. Cette étude a montré que la température en entrée de la détente a un rôle primordial sur le rendement électrique. De plus, ajouter un étage de détente au système de déstockage multiplierai au moins par un facteur 4 le

rendement électrique. Nos efforts se concentrent actuellement sur la recherche d'une micro-turbine adaptable à nos conditions expérimentales.

Les perspectives de ce projet consistent à améliorer la modélisation du système en prend en compte les rendements mécaniques et électriques des appareils de compression et de détente, en ajoutant le modèle du réservoir, et en dimensionnant les échangeurs de chaleur pour la récupération des calories et des frigories. Il sera alors possible de définir un rendement thermique.

Nomenclature

Symbole	Nom, unité
C_p	Capacité calorifique, $kJ/kg/^\circ C$
E	Energie, kWh
h	Enthalpie, kJ
MAC	Moteur à air comprimé
\dot{m}	Débit massique, kg/h
n	Coefficient polytropique
P	Puissance électrique, kW
P	Pression, atm
Q	Puissance thermique, kW
T	Température, $^\circ C$
t	Temps, h
V	Volume du réservoir, m^3

Symboles grecs	
γ	Coefficient isentropique
η	Rendement

Exposant, Indices	
amb	ambient
C, comp	compression
charge	phase de charge
D, dét	détente
décharge	phase de décharge
élec	électrique

Références

- [1] D. O. Akinyele et R. K. Rayudu, Review of energy storage technologies for sustainable power networks, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 8, Pages 74-91, 2014.
- [2] M. Nakhamkin, M. Chiruvolu, et C. Daniel. Available compressed air energy storage (CAES) plant concepts, *Energy*, Volume 4100, Pages 0-81, 2010.
- [3] J.-L. Liu et J.-H. Wang, Thermodynamic analysis of a novel tri-generation system based on compressed air energy storage and pneumatic motor, *Energy*, Volume 91, Pages 420-429, 2015.
- [4] Y. M. Kim et D. Favrat, Energy and exergy analysis of a micro-compressed air energy storage and air cycle heating and cooling system, *Energy*, Volume 35 n° 1, Pages 213-220, 2010.
- [5] E. Jannelli, M. Minutillo, A. Lubrano Lavadera, et G. Falcucci, A small-scale CAES (compressed air energy storage) system for stand-alone renewable energy power plant for a radio base station: A sizing-design methodology, *Energy*, Volume 78, Pages 313-322, 2014.
- [6] E.A. Bouman et E.G. Hertwich, Environmental impacts of balancing offshore wind power with compressed air energy storage (CAES), *Energy* Volume 8, Pages 91-5, 2016.
- [7] F. de Bosio et V. Verda, Thermoeconomic analysis of a compressed air energy storage (CAES) system integrated with a wind power plant in the framework of the {IPEX} market, *Applied Energy*, Volume 82, Pages 152-173, 2015.
- [8] A.H. Alami, Experimental assessment of compressed air energy storage (CAES) system and buoyancy work energy storage (BWES) as cellular wind energy storage options, *Journal of Energy Storage*, Volume 43, Pages 1-38, 2015.
- [9] E. Jannelli, M. Minutillo, A.L. Lavadera, et G. Falcucci, A small-scale CAES (compressed air energy storage) system for stand-alone renewable energy power plant for a radio base station: a sizing-design methodology, *Energy*, Volume 22, Pages 78-313, 2014.
- [10] M. Saadat, F.A. Shirazi et P.Y. Li, Modeling and control of an open accumulator compressed air energy storage (CAES) system for wind turbines, *Applied Energy*, Volume 16, Pages 137-603, 2015.
- [11] T. A. C. Maia, J. E. M. Barros, B. J. Cardoso Filho, et M. P. Porto, Experimental performance of a low cost micro-CAES generation system, *Applied Energy*, Volume 182, Pages 358-364, 2016.

25-27 Octobre 2017
Monastir - Tunisie